



DISERTASI

**TRANSFER OKSIGEN FISIK BERDASARKAN KEKASARAN
PERMUKAAN DAN KOMPONEN KECEPATAN
KONTAKTOR
*DI ROTATING BIOLOGICAL CONTACTOR***

Novirina Hendrasarie

3314301002

DOSEN PEMBIMBING

Prof. Ir. Joni Hermana, MScES.,Ph.D.

Dr. Tantular Nurtono, ST.,M.Eng.

PROGRAM DOKTOR

JURUSAN TEKNIK LINGKUNGAN

FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2017

LEMBAR PENGESAHAN

TRANSFER OKSIGEN FISIK BERDASARKAN KEKASARAN PERMUKAAN DAN KOMPONEN KECEPATAN KONTAKTOR DI ROTATING BIOLOGICAL CONTACTOR

THE TRANSFER OF PHYSICAL OXYGEN BASED ON THE SURFACE ROUGHNESS AND VELOCITY COMPONENT OF CONTACTOR IN ROTATING BIOLOGICAL CONTACTOR

Disertasi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Doktor (Dr.)
Di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Oleh :
NOVIRINA HENDRASARIE
NRP. 3314301002

Tanggal Ujian :
Periode Wisuda :

Disetujui oleh Tim Penilai Ujian Kualifikasi dan Disertasi Program Doktor :

1. Prof. Ir. Joni Hermana, MScES.,Ph.D. (Promotor)
NIP. 1960 06 18 1988 03 1002
2. Dr. Tantular Nurtono, ST., M.Eng. (Co Promotor)
NIP. 1972 05 20 1997 02 1001
3. Prof. Dr.Ir. Nieke Karnaningroem, M.Sc. (Penguji Internal,
NIP. 1955 01 28 1985 03 2001 T. Lingkungan, ITS)
4. Prof. Dr.Ir. Sugeng Winardi, M.Eng. (Penguji Internal,
NIP. 1952 09 16 1980 03 1002 T.Kimia, ITS)
5. Prof. Ir. Suprihanto Notodarmojo,Ph.D. (Penguji Eksternal,
NIP. 1954 12 09 1980 03 1002 T. Lingkungan, ITB)







Surabaya,
Dekan FTSP
H. Pujiwanti Setiarti, M.Sc.,Ph.D
NIP. 19590427 198503 2 001

TRANSFER OKSIGEN FISIK BERDASARKAN KEKASARAN PERMUKAAN DAN KOMPONEN KECEPATAN KONTAKTOR DI *ROTATING BIOLOGICAL CONTACTOR*

Nama Mahasiswa : Novirina Hendrasarie
NRP : 3314301002
Pembimbing : Prof. Joni Hermana, MScES., Ph.D.
Co-pembimbing : Dr. Tantular Nurtono, ST., MEng.

ABSTRAK

Transfer oksigen di reaktor pengolah limbah *Rotating Biological Contactor* (RBC) merupakan faktor penting, karena berpengaruh terhadap efisiensi RBC. Tetapi dalam aplikasinya untuk mengolah limbah, sering mengalami defisit oksigen saat operasional. Beberapa literatur mengkaji upaya meningkatkan transfer oksigen dengan memperbesar geometri reaktor, meningkatkan jumlah disk dan stage, meningkatkan kecepatan putaran disk. Dalam penelitian ini, upaya untuk meningkatkan transfer oksigen, dengan memasukkan faktor kekasaran permukaan disk (K_{vg}). Sehingga dapat meningkatkan transfer oksigen tanpa memperbesar geometri reaktor dan tanpa meningkatkan kecepatan putaran disk. Tujuan khusus dalam penelitian ini, membuat model empirik untuk memprediksi transfer oksigen di RBC dan mempelajari mekanismenya.

Penelitian yang dikerjakan terdiri dari dua pekerjaan utama, yaitu: kajian eksperimental dan model. Model empirik dengan metoda analisis dimensi dan visualisasi aliran menggunakan perangkat lunak *Computational Fluid Dynamic* (CFD). Pada kajian eksperimental, air baku yang digunakan air bersih, tanpa *biofilm*. Variabel peubah yang digunakan kekasaran permukaan (K_{vg}) dan komponen kecepatan disk. K_{vg} yang dianalisa, meliputi ukuran mikrometer (K_v) dan makrometer (K_g). Komponen kecepatan disk, meliputi kecepatan di sisi tepi disk (ωR) dan kecepatan karena kedalaman disk (ωH)

Hasil penelitian, didapatkan dengan memasukkan faktor kekasaran permukaan (K_{vg}), mampu meningkatkan transfer oksigen fisik di RBC. Selanjutnya dikembangkan model untuk mengestimasi transfer oksigen fisik, berdasarkan analisis dimensi. Model estimasi transfer oksigen fisik (K_{La}) di RBC dipengaruhi oleh tiga kelompok utama, yaitu : (1) gaya-gaya yang bekerja (dapat dilihat dari bilangan *Sherwood*); (2) parameter desain dan operasi, yang meliputi : kecepatan putaran, kekasaran permukaan, diameter, luas disk, luas permukaan *bulk rector*, luas basah disk, ketebalan *liquid film*, *working volume*; (3) kedalaman area disk (dihitung dengan menggunakan jari-jari disk dan jarak poros disk terhadap permukaan air di *bulk reactor*). Ketiga kelompok tersebut telah terintegrasi pada persamaan model transfer oksigen fisik yang dihasilkan.

Selanjutnya, penelitian ini juga mempelajari mekanisme transfer oksigen fisik di RBC. Pada mekanisme transfer oksigen fisik pada rangkaian disk permukaan datar (K_{La})_f, didapatkan dua kondisi mekanisme berdasarkan

kekasaran permukaan. Pada mekanisme yang pertama, di kekasaran permukaan kurang dari 10 nm, maka transfer oksigen fisik melalui turbulensi (K_{La_t}). Mekanisme yang kedua, di kekasaran permukaan lebih dari 50 nm, transfer oksigen melalui turbulensi (K_{La_t}) dan *liquid film* (K_{La_d}). Sedangkan mekanisme transfer oksigen fisik pada rangkaian disk permukaan berkontur (K_{La_g}), konsepnya sama dengan di disk permukaan datar, tetapi perbedaannya di parameter kekasaran permukaan secara makroskopik (K_g) dan *specific interfacial* (S_i). Dengan menambahkan nilai K_g saja, tidak bisa menggambarkan perubahan pola kontur permukaan disk yang variatif. Maka dalam penelitian ini, diperkenalkan, variabel baru, yaitu N_{ITS} (*The number of roughness and contoured surface, in rotating vertically flow*). Dengan adanya K_{ITS} ini, diharapkan akan mempermudah aplikasi di lapangan untuk pemilihan jenis material disk dan pola konturnya.

Kata kunci: Transfer oksigen, *Liquid film*, Kekasaran permukaan, Kecepatan putaran, *Rotating Biological Contactor*

THE TRANSFER OF PHYSICAL OXYGEN BASED ON THE SURFACE ROUGHNESS AND VELOCITY COMPONENT OF CONTACTOR IN ROTATING BIOLOGICAL CONTACTOR

Name : Novirina Hendrasarie
Student ID : 3314301002
Supervisor : Prof. Joni Hermana, MScES., Ph.D.
Co-supervisor : Dr. Tantular Nurtono, ST., MEng.

ABSTRACT

Oxygen transfer of a Rotating Biological Contactor (RBC) reactor is an important factor, since it affect the RBC efficiency. Insufficient level of oxygen is a common condition during its operation in waste water processing. Thus, researchers attempted to increase the oxygen transfer capability by either enlarging the reactor geometry, increasing the number of discs and stages or increasing the velocity of the discs rotation. In this work, the attempt to increase the RBC oxygene transfer capability was done by solely including a variety of surface roughness factor of the disc (K_{vg}) without enlarging the reactor geometry and without increasing the rotational velocity of the discs. The work was also aiming to develop an empirical model to predict the RBC oxygen transfer capability and its mechanism.

The experiment was performed by making use of an RBC with vertical rotating discs partially immersed in an open basin. Ability of the method to increase the oxygen transfer capability was determined using experimental work, empirical model based on dimensional analysis and flow visualization based on computational fluid dynamic (CFD). The raw water used during the experiment was only using an amount of clean water without any biofilm. Some variables used in this research were surface roughness (K_{vg}) and component of disc velocity. K_{vg} which is affected by the micrometer (K_v) and macrometer (K_g) measurement. Component of disc velocity consists of peripheral velocity (ωR) and velocity due to the depth of the disc (ωH)

It was justified in this work that the incorporation of the surface roughness factor (K_{vg}) was able to increase the capability of oxygen transfer in RBC. A model was developed using dimension anaysis method to estimate the physical oxygene transfer (K_{La}). Such transfer in RBC is affected by three primary situation of: (1) affecting forces during the process (represented from the Reynolds number and the Froud number); (2) Desain and operation parameter of rotational velocity, disc surface roughness, bulk reactor surface area, disc wetted area, liquid film thickness, and working volume; (3) immersed disk area (calculated by using the disk radius and its shaft distance to the water surface inside the bulk reactor). Thus, all the above mentioned three primary situation were included in the model.

Further, the work was also studying the mechanism of physical oxygene transfer under a series of flat discs (K_{La})_f, there were two kind mechanism of oxygen transfer due to the roughness of the disc surfaces. The first mechanism

was occurred on the surface having a roughness level of lower than 10 nm that only turbulence mechanism (K_{La_t}) was observed while the second one with a roughness level of higher than 50 nm, both the turbulence mechanism (K_{La_t}) and the liquid film mechanism (K_{La_d}) were observed. The work also utilised a series of contoured discs denoted as $(K_{La})_g$ which was determined by its macroscopic surface roughness (K_g) and its specific interfacial factor (S_i). A new variable of roughness number and contoured surface in rotating vertically flow (N_{ITS}) was introduced to adapt the application of the method due to the discs material and surface contour pattern. Such a new variable was introduced to resolve the problem that the utilisation of K_g was insufficient to represent a wide variety of disc surface contours and patterns.

Key Words : Oxygen transfer, Liquid film, surface roughness, rotational speed, Rotating Biological Contactor

Kata Pengantar

Alhamdulillah rabbil ‘alamiin, segala puji syukur penulis panjatkan ke hadirat ALLAH SWT. Atas berkah rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan disertasi ini dengan baik. Dalam kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada:

1. Prof. Ir. Joni Hermana, MSc.ES., Ph.D., dan Dr. Tantular Nurtono, ST., M.Eng., selaku tim promotor yang telah membimbing dalam disertasi ini
2. R. Sanggar Dewanto, ST., MT., Ph.D. atas bantuan pemikiran, dorongan untuk selalu bisa berpikir kritis dan bimbingannya dalam disertasi ini
3. Prof. Dr. Ir. Nieke Karnaningroem, MSc., Prof. Dr. Ir. Sugeng Winardi, M.Eng., dan Prof. Ir. Suprihanto Notodarmojo, Ph.D, selaku dosen penguji yang telah banyak memberikan arahan dan saran yang sangat berharga
4. Ditjen DIKTI atas beasiswa BPPDN yang telah diberikan
5. Segenap dosen dan karyawan jurusan Teknik Lingkungan ITS atas bantuan yang telah diberikan.
6. Segenap karyawan di Laboratorium Manufaktur, Politeknik Negeri Surabaya.
7. Dr. Ir. Minarni N.T., MT., Juli Winarti, ST., dan Ir. Tri Budi Sutjahyo atas sumbangan pemikiran, tenaga dan dukungannya dalam penelitian ini
8. Keluarga besar penulis, terima kasih atas doa, dukungan dan motivasinya.
9. Rekan mahasiswa S1 Teknik Kimia ITS atas kerjasamanya dalam disertasi ini
10. Rekan seperjuangan S3 di Teknik Lingkungan, ITS Surabaya
11. Keluarga besar UPN”Veteran” Jatim atas dukungan doa dan semangatnya
12. Pihak-pihak lain yang tidak bisa kami sebutkan satu persatu, atas segala bantuan dan dukungannya.

Penulis menyadari bahwa disertasi ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan. Akhir kata, semoga disertasi ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu, khususnya Teknik Lingkungan.

Surabaya, Agustus 2017

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xix
DAFTAR NOTASI	xxi
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Manfaat Penelitian	4
1.5. Ruang Lingkup	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	
2.1. Rotating Biological Contactor	5
2.2. Koefisien Transfer Oksigen	5
2.3. Transfer Oksigen Fisik di RBC	7
2.3.1. Mekanisme Transfer Oksigen Berdasarkan Literatur	9
2.4. Konsep Dasar Pemikiran Teoritis	11
2.4.1. Faktor Turbulensi di RBC	14
2.4.2. Faktor Ketebalan <i>Liquid Film</i> di RBC	19
2.5. Model Empirik Analisis Dimensi	26
2.5.1. Model Empirik Pada <i>Liquid Film</i> di RBC	27
2.5.2. Model Empirik Pada Transfer Oksigen di RBC	29
2.6. Model Hidrodinamika Aliran, Berbasis CFD di RBC	30
2.6.1. Pemodelan <i>Liquid Film</i> di RBC Berbasis CFD	31
2.6.2. Pemodelan Transfer Oksigen di RBC Berbasis CFD	34
2.7. Pemetaan Penelitian Model Transfer Oksigen Fisik di RBC	35
2.8. Kebaruan Penelitian (<i>State of The Art</i>)	39
BAB 3 METODE PENELITIAN	
3.1. Rancangan Penelitian Tahap 1. Ketebalan <i>Liquid Film</i> di Disk	43
3.1.1. Variabel Penelitian	43
3.1.2. Bahan dan Alat	44
3.1.3. Langkah Percobaan	45
3.1.4. Analisis Data	46
3.2. Rancangan Penelitian Tahap 2. Nilai K_{La} di RBC	46
3.2.1. Variabel Penelitian	47
3.2.2. Bahan dan Alat	47
3.2.3. Langkah Percobaan	48
3.2.4. Analisis Data	49
3.3. Rancangan Penelitian Tahap 3. Membangun Model Empirik Analisis Dimensi dan Memvisualisasi Dengan CFD	49

3.3.1.	Membangun Model Empirik Analisis Dimensi	49
3.3.2.	Memvisualisasi Model Hidrodinamika Aliran Berbasis CFD	50
3.4.	Kerangka Penelitian	54
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		
4.1.	Ketebalan <i>Liquid Film</i> di RBC	57
4.1.1.	Ketebalan <i>Liquid Film</i> di Disk Permukaan Datar Berdasar Eksperimen	57
4.1.1.1.	Pengaruh Komponen Kecepatan Putaran di Disk Permukaan Datar Terhadap Ketebalan <i>Liquid Film</i>	57
4.1.1.2.	Pengaruh Material Disk Terhadap Karakteristik Aliran <i>Liquid Film</i> di Disk Permukaan Datar	61
4.1.1.3.	Uji Statistik Untuk Ketebalan <i>Liquid Film</i> di Disk Permukaan Datar	66
4.1.2.	Ketebalan <i>Liquid Film</i> di Disk Permukaan Berkontur Secara Eksperimen	67
4.1.2.1.	Profil Ketebalan <i>Liquid Film</i> di Permukaan Berkontur	67
4.1.2.2.	Ketebalan <i>Liquid Film</i> di Disk Permukaan Datar Dibanding Dengan Permukaan Berkontur	70
4.1.2.3.	Uji Hubungan Komponen Kecepatan dan Kekasaran Permukaan Terhadap Ketebalan <i>Liquid Film</i> di Disk Permukaan Berkontur	72
4.1.3.	Membangun Model Empirik Estimasi Ketebalan <i>Liquid Film</i> di RBC	73
4.1.3.1.	Membangun Model Empirik Estimasi Ketebalan <i>Liquid Film</i> , di Disk Permukaan Datar	74
4.1.3.2.	Membangun Model Empirik Estimasi Ketebalan <i>Liquid Film</i> di Disk Permukaan Berkontur	84
4.1.4.	Visualisasi <i>Liquid Film</i> Menggunakan Model Numerik Berbasis CFD	87
4.1.4.1.	Evaluasi <i>Liquid Film</i> Tidak Terbentuk Merata di Permukaan Disk, Pada Simulasi CFD	92
4.2.	Transfer Oksigen Fisik Di RBC	98
4.2.1	Transfer Oksigen Fisik di Permukaan Disk Datar, Secara Eksperimen	99
4.2.1.1.	Nilai K_{La} di RBC, Dengan Satu Disk	99
4.2.1.2.	Nilai K_{La} di Reaktor Dengan Empat Belas Disk Permukaan Datar	102
4.2.2	Transfer Oksigen Fisik di Disk Permukaan Berkontur Secara Eksperimen	105
4.2.2.1.	Nilai K_{La} di Reaktor Dengan Satu Disk Permukaan Berkontur	105
4.2.2.2.	Nilai K_{La} di Reaktor Dengan Empat Belas Disk Permukaan Berkontur	109
4.2.3	Uji Statistik Komponen Kecepatan Putaran dan Kekasaran Permukaan Terhadap K_{La} di RBC	114
4.2.3.1.	Di Satu Disk, Permukaan Datar dan Berkontur	114

4.2.3.2. Di Empat Belas Disk Permukaan Datar dan Berkontur	116
4.2.4. Model Empirik Untuk Nilai Transfer Oksigen di RBC	118
4.2.4.1 Analisis Dimensi K_La , Pada Disk Permukaan Datar, di RBC	118
4.2.4.1.1 Penggabungan Model K_La	124
4.2.4.1.2 Verifikasi Model Terbangun K_La di Disk Permukaan Datar	125
4.2.4.1.3 Validasi Model Terbangun K_La di Disk Permukaan Datar	129
4.2.4.2. Analisis Dimensi K_La , Disk Permukaan Berkontur di RBC	132
4.3. Variabel Baru Yang Mewakili Kekasaran dan Pola Kontur di Permukaan Disk	136
4.4. Peranan Model Terbangun Terhadap Aplikasi RBC Sebagai Pengolah Limbah Organik.	142
BAB 5 KESIMPULAN	
5.1. Kesimpulan	147
5.2. Saran	148
DAFTAR PUSTAKA	149
LAMPIRAN	155
BIOGRAFI PENULIS	228

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	RBC <i>Contoured Disc</i> Tertutup <i>Biofilm</i> (Hendrasarie, <i>et al.</i> , 2014)	5
Gambar 2.2.	Skema Transfer Gas Melalui <i>Interface</i> (Benefield & Randall, 1980)	7
Gambar 2.3.	Konfigurasi RBC (Prins & Pretorius, 1987)	12
Gambar 2.4.	Skematik Hubungan Ketiga Zona di RBC (Prins & Pretorius, 1987)	12
Gambar 2.5.	Transport Partikel pada Aliran Laminer dan Turbulen	15
Gambar 2.6.	Hubungan Profil nilai K_L Terhadap ω (Zeevalkink <i>et al.</i> , 1979)	18
Gambar 2.7.	<i>Rotating Vertically Disc</i> (Zeevalkink <i>et al.</i> , 1978)	20
Gambar 2.8.	Hasil Eksperimen <i>Liquid Film</i> , oleh Bintanja <i>et al.</i> , 1975	20
Gambar 2.9	Hubungan δ Terhadap $V_c^{0.5}$ (Zeevalkink <i>et al.</i> , 1978)	21
Gambar 2.10.	Pembagian Aliran Akibat Permukaan Tidak Licin Hidraulik	24
Gambar 2.11.	Tipe Permukaan Berkontur Pada Aliran Air (Pery <i>et al.</i> , 1969)	25
Gambar 2.12.	Tipe Aliran Air Pada Permukaan Berkontur Dengan Variasi Kedalaman dan Lebar Kotak	25
Gambar 2.13.	Skematik Aliran <i>Liquid Film</i> di <i>Rotating Vertically Disc</i>	27
Gambar 2.14	Profil Ketebalan <i>Liquid Film</i> di Disk (Avanasiev <i>et al.</i> , 2008)	31
Gambar 2.15	Hasil Simulasi Metoda VOF, CFD (Miah <i>et al.</i> , 2016)	32
Gambar 2.16	<i>Sory Line Dissertation</i>	42
Gambar 2.17.	Kedudukan Penelitian Yang Diusulkan Pada peta Penelitian Transfer Oksigen Fisik di RBC	43
Gambar 3.1.	Reaktor RBC Dengan <i>Single Disc</i>	44
Gambar 3.2.	Skema Permukaan Disk Berkontur	45
Gambar 3.3.	Area Yang Diarsir Adalah Area Spon	46
Gambar 3.4.	Model Fisik RBC Dengan 14 Disc	48
Gambar 3.5.	Konfigurasi Sistem RBC Yang Digunakan Penelitian ini	51
Gambar 3.6.	Hasil Pembuatan <i>Grid</i> Dari Model <i>Flat Disc</i>	52
Gambar 3.7.	Bidang Pengamatan RBC Menggunakan CFD	54
Gambar 3.8.	Tahapan Penelitian Yang Dilaksanakan	55
Gambar 4.1.	Hubungan δ_{rf} Dengan $\omega^{0.5}$ di <i>Flat Disc</i>	59
Gambar 4.2.	Grafik Hubungan δ_{rf} Dengan Nilai V_c	60
Gambar 4.3.	Visualisasi Air di Tiap Permukaan Disk	61
Gambar 4.4.	Ketebalan <i>Liquid Film</i> Pada Material Disk	62
Gambar 4.5.	Gambar AFM Permukaan Kontak Material <i>Acrylic</i> , <i>Novotex O</i> dan <i>Novotex I</i>	63
Gambar 4.6.	Hubungan Kekasaran Permukaan (RMS) Dengan Ketebalan <i>Liquid Film</i>	64

Gambar 4.7.	Desain Faktorial Utama Untuk Ketebalan <i>Liquid Film</i>	66
Gambar 4.8.	Interaksi Antar Faktor dan Level Terhadap Ketebalan <i>Liquid Film</i>	67
Gambar 4.9.	Ketebalan <i>Liquid Film</i> di Disk Berkontur Tipe 1,2,3	69
Gambar 4.10.	Ketebalan <i>Liquid Film</i> di Disk Datar dan Berkontur	72
Gambar 4.11.	Desain Faktorial Utama <i>Liquid Film, Contoured Disc</i>	73
Gambar 4.12.	Interaksi Antar Faktor dan Level Terhadap Ketebalan <i>Liquid Film</i> , di Disk Berkontur	74
Gambar 4.13.	Hasil Uji Kedekatan Data Material Hidrofobik (<i>Acrylic-Novotex O</i>)	77
Gambar 4.14.	Nilai δ Eksperimen Dengan δ Model Terbangun, Metoda Analisis Dimensi, (a) di material <i>acrylic</i> ; (b) material <i>novotex O</i> ; (c) material <i>novotex I</i>	78
Gambar 4.15.	Profil Aliran <i>Liquid Film</i> , Pada Kecepatan Putaran Yang Berbeda	79
Gambar 4.16.	Profil Aliran <i>Liquid Film</i> , Di Kekasaran Permukaan Berbeda, di $H = 63$ mm, Pada $\omega = 10$ rpm,	80
Gambar 4.17.	Profil Aliran <i>Liquid Film</i> , Pada Kekasaran Permukaan Berbeda, di (a) $H = 7.0$ cm; (b) $H = 6.3$ cm; (c) $H = 2.5$ cm	80
Gambar 4.18.	Validasi Ketebalan <i>Liquid Film</i> , Model Terbangun Terhadap Data Literatur	82
Gambar 4.19.	Keterangan Simbol Dari <i>Contoured Disc</i>	85
Gambar 4.20.	<i>Fitting Data δ di Ketiga Tipe Contoured Disc.</i>	87
Gambar 4.21.	Kondisi Awal Simulasi Dengan Disk Tercelup Air, $H = 7$ cm	88
Gambar 4.22.	Daerah <i>drag-in</i> dan <i>drag-out</i>	89
Gambar 4.23.	Kontur Fraksi Volume Fase <i>Liquid</i> ($\mu = 0,001$ kg/m.s) Kondisi Transient, Tampak Depan ($t = 2,6$ detik)	90
Gambar 4.24.	Potongan Melintang Disk Per Segmen	91
Gambar 4.25.	Vektor Kecepatan, <i>Solver Transient</i> pada $t = 2,6$ detik	91
Gambar 4.26.	Distribusi <i>Liquid</i> ($\mu = 10$ kg/m.s) Tampak Depan, Kondisi Transient, Di $H = 2.5$ cm, $\omega = 20$ rpm, Pada $t =$ (a) 0.1s; (b) 0.495 dt; (c) 1.435 dt; (d) 2.09 dt; (e) 3.15 dt; (f) 4.00 dt; (g) 5.35 dt; (h) 6.65 t; (i) 7.95 dt.	93
Gambar 4.27.	Distribusi <i>Liquid Film</i> ($\mu = 0.00086$ kg/m.s) Tampak Depan, Dengan $H = 2.5$ cm, $\omega = 20$ rpm, Pada Material Bersifat (a) Hidrofobik, material <i>acrylic</i> , $K_v = 2.152$ nm; (b) Hidrofilik, material <i>novotex I</i> , $K_v = 95.262$ nm	94
Gambar 4.28.	Garis Proyeksi Aliran <i>Liquid Film</i> , Zeevalkink <i>et al.</i> , 1978	95
Gambar 4.29.	Ketebalan <i>liquid film</i> pada variasi viskositas pada posisi radial yang berbeda, pada $w = 3$ rpm (Miah <i>et al.</i> , 2016)	97
Gambar 4.30.	Nilai K_{La} Pada Kedalaman Disk Yang Berbeda	100
Gambar 4.31.	Nilai K_{La} di <i>Single Flat Disc</i> pada Material Disk Berbeda	101
Gambar 4.32.	Nilai K_{La_f} Di RBC Dengan <i>14 Flat Disc</i> di H Berbeda	103
Gambar 4.33.	Nilai K_{La_f} Di RBC <i>1 Stage- 14 Flat Disc</i> Pada Material Disk Berbeda	104

Gambar 4.34.	Nilai K_{La} di <i>Single Contoured Disc</i> , Material (a) <i>Novotex O</i> ; (b) <i>Novotex I</i>	106
Gambar 4.35.	Nilai K_{La_g} dan K_{La_f} Material (a) <i>Novotex O</i> ; (b) <i>Novotex I</i>	108
Gambar 4.36.	K_{La_g} Di RBC Dengan 14 <i>Contoured Disc</i> Pada Tipe Disk Yang Berbeda, (a) <i>Novotex O</i> ; (b) <i>Novotex I</i>	111
Gambar 4.37.	Nilai K_{La_g} Di RBC Dengan 14 <i>Disc</i> Pada Kedalaman Yang Berbeda, (a) <i>Novotex O</i> ; (b) <i>Novotex I</i>	112
Gambar 4.38.	Plot Faktor Utama Yang Berpengaruh Terhadap K_{La} Pada <i>Single Disc</i>	115
Gambar 4.39.	Interaksi Antar Faktor dan Level Terhadap K_{La} , di <i>Single Disc</i>	115
Gambar 4.40.	Faktor Utama Yang Berpengaruh Terhadap K_{La} 14 Disk	117
Gambar 4.41.	Interaksi Antar Faktor dan Level Terhadap K_{La} , 14 Disk	117
Gambar 4.42.	Rasio Nilai K_{La} Model dengan K_{La} Eksperimen di <i>Flat Disc</i> (a) Material <i>acrylic</i> , $K_v < 10$ nm; (b) Gabungan Material <i>Novotex O-I</i> , $K_v > 50$ nm	125
Gambar 4.43.	Hubungan YI dan ω Terhadap nilai K_L , di Material: (a) <i>Acrylic</i> ; (b) <i>Novotex O</i> dan (c) <i>Novotex I</i>	127
Gambar 4.44	Hubungan nilai Transfer Oksigen (K_{La}) Dengan Kekasaran Permukaan (K_v), di kedalaman (a) $H=7$ cm; (b) $H=6.3$ cm (c) $H=2.5$ cm	129
Gambar 4.45.	Validasi Non-Dimensional Model Untuk <i>Liquid Film</i> Berdasar Data Literatur, (a) Uji Dari Persamaan 4.20; (b) Uji Dari Persamaan 4.21	130
Gambar 4.46.	Rasio Nilai K_{La} Model, dengan K_{La} Eksperimen di <i>Contoured Disc</i> ; (a) Pola radial; (b) Pola radial – vertikal	135
Gambar 4.47	Pengaruh Kekasaran Permukaan Pada Diagram Pembagian Kecepatan Suatu Saluran Terbuka (Anggrahini, 2005)	136
Gambar 4.48.	Bilangan N_{ITS} Pada K_{La} <i>Flat Disc</i> (a) Validasi Dengan Literatur Yang Ada; (b) K_{La} di $H=7$ cm dan	139
Gambar 4.49.	Bilangan N_{ITS} Pada Nilai K_{La} di <i>Contoured Disc</i> di Kedalaman Disk (a) $H=7$ cm; (b) $H=6.3$ cm dan (c) $H=2.5$ cm	141

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Tekanan jenuh uap air (\bar{p}) yang berkontak dengan udara	8
Tabel 2.2.	Penelitian Yang Sudah Dilakukan Tentang Penentuan K_{La}	37
Tabel 2.3.	Studi penentuan ketebalan <i>liquid film</i> (δ) dan <i>boundary layer</i> (δ_b) di <i>Rotating Vertically Disk</i>	40
Tabel 3.1.	Spesifikasi Reaktor <i>Single Disc</i> , Penelitian Tahap 1	44
Tabel 3.2.	Luas Disk Tiap Tipe Bentuk Permukaan Berdasar Kedalaman	45
Tabel 3.3.	Spesifikasi Reaktor RBC, Penelitian Tahap 2	47
Tabel 3.4.	Rincian Dimensi <i>Vertically Rotating Disc</i>	51
Tabel 3.5.	Kondisi Operasional Yang Digunakan	52
Tabel 4.1.	Ketebalan Rata-Rata <i>Liquid Film</i> (δ_{rf}) di <i>Flat Disc</i>	58
Tabel 4.2.	Nilai parameter kekasaran permukaan di material <i>acrylic, novotex O, novotex I</i>	64
Tabel 4.3.	Ketebalan Rata-Rata <i>Liquid Film</i> di <i>Contoured Disc</i> , $T=26^\circ\text{C}$	68
Tabel 4.4.	Nilai Koefisien Hasil Simulasi Regresi Linier Berganda Untuk δ <i>Flat Disc</i>	76
Tabel 4.5.	Range Parameter Dan Yang Ditetapkan Untuk Model <i>Liquid Film</i> Terbangun	83
Tabel 4.6.	Nilai Koefisien Hasil Simulasi Regresi Linier Berganda Untuk δ <i>Contoured Disc</i>	85
Tabel 4.7.	Parameter Komputasional Pada <i>Rotating Vertically Flat Disc in Free Surface</i>	96
Tabel 4.8.	Nilai h' Akibat Perbedaan Viskositas	97
Tabel 4.9.	Nilai K_{La_f} di <i>Single Flat Disc</i> , Pada $T=26^\circ\text{C}$	99
Tabel 4.10.	Nilai K_{La_f} Rata-Rata di 14 <i>Flat Disc</i> RBC, Pada $T=26^\circ\text{C}$	102
Tabel 4.11.	Nilai K_{La_g} di <i>Single Contoured Disc</i> , Pada $T=26^\circ\text{C}$	106
Tabel 4.12.	Nilai K_{La_g} Pada RBC Dengan 14 <i>Contoured Disc</i>	110
Tabel 4.13.	Desain faktorial Untuk K_{La} di <i>Single Flat – Contoured Disc</i>	114
Tabel 4.14.	Desain faktorial untuk K_{La} di 14 <i>Flat & Contoured Disc</i>	116
Tabel 4.15.	Koefisien Hasil Simulasi Regresi Linier Berganda Untuk nilai K_{La} <i>Flat Disc</i> , Skenario 1	122
Tabel 4.16.	Koefisien Hasil Simulasi Regresi Linier Berganda Untuk nilai K_{La} <i>Flat Disc</i> , Skenario 2	123
Tabel 4.17.	Kisaran Nilai Parameter Yang Ditetapkan Untuk Model K_{La} Terbangun	131
Tabel 4.18.	Nilai Koefisien Hasil Simulasi Regresi Linier Berganda Untuk K_{La} <i>Contoured Disc</i>	134
Tabel 4.19.	Tipe Resime Berdasar Kekasaran Permukaan (K_g) di RBC	137
Tabel 4.20.	Nilai N_{ITS} Pada <i>Flat dan Contoured Disc</i>	138

DAFTAR NOTASI

A_d	Luas disk total (m^2)
A_{df}	Luas disk di <i>flat disc</i> , ($0.25\pi D^2$) (m^2)
A_t	Luas <i>interfacial area</i> reaktor (m^2)
A_w	Luas disk basah (m^2)
B_M	Berat Molekul (gr/gr mol)
C_0	Nilai oksigen terlarut pada cairan pada waktu $t=0$ (mg/L)
C_t	Nilai oksigen terlarut pada cairan pada waktu t (mg/L)
$(C_s)_{760}$	Nilai kejenuhan oksigen terlarut pada tekanan udara 760 mmHg (mg/L)
D_L	Diffusi Oksigen ke air (m^2/s)
D_v°	Difusi fase cair zat terlarut dan pelarut, cm^2/dt
di	Lebar gerigi bentuk kotak dalam <i>contoured disc</i> (m)
dy	Lebar jurang bentuk kotak dalam <i>contoured disc</i> (m)
dt	Lebar gerigi dan jurang dalam <i>contoured disc</i> (m)
e	Jarak dari sisi luar disk ke sisi dalam reaktor (m)
g	Percepatan gravitasi (m/s^2)
G_{value}	Perbandingan antara volume bejana dan luas permukaan disk (L/m^2)
H	Jarak disk yang tidak terendam air, dari pusat disk ke air (m)
h	Ketebalan <i>boundary layer</i> di disk pada bawah permukaan air (m)
I	Kedalaman imersi ($=(\phi-\phi_0)/\phi$) (-)
K_v	Kekasaran Permukaan di <i>flat disc</i> , skala mikroskopik (m)
K_g	Kekasaran Permukaan di <i>contoured disc</i> , skala makroskopik (m)
K_{vg}	Kekasaran Permukaan total (m)
K_{La}	Koefisien transfer oksigen (menit ⁻¹)
K_{La_t}	Koefisien transfer oksigen melalui turbulensi (menit ⁻¹)
K_{La_d}	Koefisien transfer oksigen melalui <i>liquid film</i> di disk (menit ⁻¹)
M	Selisih berat spon (gram)
n	Jumlah disk (-)
N_v	<i>Volume renewal number</i> (min ⁻¹)
N_{Re}	<i>Reynolds Number</i>
P	Tekanan barometrik (mmHg)
\bar{p}	Tekanan jenuh uap air pada suhu tertentu (Tabel 2.1)
P_{Ai}	Tekanan gas <i>Interface</i>
P_{Ag}	Tekanan <i>bulk gas</i>
R	Jari-jari disk (m)
S_d	Konsentrasi padatan terlarut dalam air (gram/L)
s	Setengah jarak antar disk (m)
S	Jarak disk (m)
T	Temperatur/Suhu ($^{\circ}C/^{\circ}K$)
t	Waktu (s)
t_R	Rata-rata waktu kontak per rotasi disk (s)
u^*	Kecepatan gesekan (/)
V	Volume cairan di reaktor (m^3)

V_A	volume molar zat terlarut pada titik didih normal (cm^3/gmol)
v_{mol}^A	volume molar zat kimia yang didifusi ($\text{cm}^3/\text{gram.mol}$) $v=M/\rho$; M = massa molar O_2 (32 gr)
YI	Koefisien Imersi
z_0	Elevasi dari kecepatan nol
K_{ITS}	<i>The number of roughness and contoured surface, in rotating vertically flow</i>

Huruf Yunani

δ	Ketebalan <i>liquid film</i> (L)
δ_{SZ}	Ketebalan <i>liquid film</i> karena putaran disk di dalam air (L)
δ_{AZ}	Ketebalan <i>liquid film</i> pada permukaan (L)
δ_f	Ketebalan <i>liquid film</i> di <i>Flat Disc</i> (L)
δ_g	Ketebalan <i>liquid film</i> di <i>Contoured Disc</i> (L)
ω	Kecepatan putaran (rpm)
\emptyset	Diameter disk (L)
\emptyset_0	Diameter disk basah (L)
ρ	Densitas cairan (ML^{-3})
μ	Absolut viskositas cairan (MLT^{-1})
δ/ε	Kekasaran relatif
$vu_{*}/\sqrt{}$	<i>Roughness Reynolds Number</i>
B	Parameter asosiasi pelarut (air = 2,26; metanol = 1,9; etanol = 1,5)
c	Kecepatan vertikal peripheral (m/min)
η	viskositas dinamis air (Nsm^{-2})
σ	Tegangan permukaan (dyne/cm)
ν	viskositas kinematis air (m^2s^{-1})
ε	Kecepatan Energi disipasi (J/kg)
s	Ketebalan <i>liquid film</i> sub layer laminar (L)
δ_{fr}	Ketebalan <i>liquid film</i> rata-rata hasil eksperimen (L)
θ	Konstanta temperatur

Singkatan

COD	<i>Chemical Oxygen Demand</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dinamic</i>
DO	<i>Dissolved Oxygen</i>
RBC	<i>Rotating Biological Contactor</i>
HLR	<i>Hydraulic Loading Rate</i>
OSL	<i>Organic Surface Loading</i>
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i>
VOF	<i>Volume of Fluid</i>
FEM	<i>Finite Element Methode</i>

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

Sistem *Rotating Biological Contactor* (RBC) adalah pengolah limbah organik, bekerja dengan memutar disk sebagai media kontak. Putaran disk di RBC bertujuan untuk meningkatkan transfer oksigen. Nilai transfer oksigen disimbolkan dengan K_{La} , merupakan koefisien transfer gas secara keseluruhan dan memiliki satuan perwaktu ($time^{-1}$). Faktor transfer oksigen di RBC merupakan faktor utama, karena berpengaruh terhadap proses aerobik dan efisiensi kinerja reaktor. Permasalahan rendahnya transfer oksigen di RBC, yang menjadi titik perhatian dalam penelitian ini.

Dari literatur, beberapa peneliti sudah melakukan penelitian tentang mekanisme dan upaya untuk meningkatkan transfer oksigen. Upaya yang dilakukan dengan memperbesar geometri reaktor, meningkatkan jumlah disk dan stage, meningkatkan kecepatan putaran disk. Tetapi, dengan upaya tersebut di atas, akan memperberat kinerja motor yang berfungsi sebagai pemutar disk. Sedangkan untuk mekanisme transfer oksigen, ada perbedaan pendapat dari literatur. Perbedaan pendapat tersebut, meliputi : (1) Pendekatan pertama, transfer oksigen di RBC melalui gerakan *liquid* di *bulk reactor* (K_{La_t}). (2) Pendekatan yang kedua, transfer oksigen melalui *liquid film* di disk saat terpapar di udara (K_{La_d}). (3) Pendekatan ke tiga menggabungkan nilai K_{La_t} dan K_{La_d} . Pendekatan yang pertama sebagian besar meneliti komponen aliran yang berpengaruh pada transfer oksigen melalui turbulensi akibat putaran (Ouano, 1978; Boumansour and Vassel, 1998). Pendekatan yang kedua, meneliti komponen yang berpengaruh pada difusi oksigen ke *liquid film* di kontaktor (Yamane dan Yoshida, 1972; Bintanja *et al.*, 1975; Zeevalkink *et al.*, 1979; Kim dan Molof, 1982; Kubsad *et al.*, 2004). Pendekatan yang ke tiga, menggabungkan nilai K_{La_t} dan K_{La_d} (Rittman *et al.*, 1983; Mukherji *et al.*, 2008).

Penelitian-penelitian tersebut di atas, media kontak yang digunakan adalah disk dengan bentuk permukaan datar (*flat disc*). Padahal, pada dekade

terakhir ini dalam aplikasinya dalam pengolahan limbah, mulai dikembangkan penelitian yang bertujuan meningkatkan performa RBC. Beberapa diantaranya : bentuk pipa (Kargi, 2001); bergelombang (Ma, 1994; Mba *et al.*, 1999; Mba, 2003); berjaring (NRBC) (Chen, *et al.*, 2006; Ashadi *et al.*, 2009); *packed cake* RBC (Sirianuntapiboon *et al.*, 2007), bentuk drum (Sima *et al.*, 2012; Carlos *et al.*, 2015), bergerigi dan berbelah (Hendrasarie *et al.*, 2014). Tetapi aplikasi tersebut belum memiliki pendekatan teori untuk memprediksi transfer oksigen di permukaan yang tidak ditentukan sebagai licin hidraulik di RBC.

Berdasar permasalahan tersebut di atas. Maka upaya untuk meningkatkan transfer oksigen dalam penelitian ini, dengan memasukkan faktor kekasaran permukaan disk (K_{vg}). Sehingga dapat meningkatkan transfer oksigen tanpa memperbesar geometri reaktor, dan tanpa meningkatkan kecepatan putaran disk. Faktor kekasaran permukaan (K_{vg}) tersebut, sekaligus merupakan kebaruan dalam penelitian ini. Dipilih faktor kekasaran permukaan, karena memiliki beberapa kelebihan, yaitu meningkatkan luas permukaan disk, meningkatkan turbulensi, efisiensi ukuran geometri reaktor. Faktor kekasaran ini, yang diteliti meliputi kekasaran permukaan ukuran mikrometer (K_v) dan ukuran makrometer (K_g). Kekasaran permukaan dengan skala mikrometer (K_v) berpengaruh untuk meningkatkan gaya gesek di permukaan solid (White, 2011). Adanya tegangan geser yang besar pada permukaan benda, menyebabkan partikel fluida terpaksa berhenti di sekitar permukaan solid karena geseran *viscous*. Kondisi berhentinya partikel fluida di sekitar permukaan solid inilah yang disebut *no slip*, keadaan yang diharapkan dalam penelitian ini. Sedangkan kekasaran permukaan dengan skala makrometer (K_g) berpengaruh untuk meningkatkan *random flow* di sekitar permukaan disk (Tanaka, 2008) dan meningkatkan turbulensi di *bulk reactor* (White, 2011). Menurut Chow (2009), kekasaran permukaan berpengaruh terutama pada kemiringan diagram kecepatan pada lapisan di dekat permukaan solid. Selain faktor kekasaran permukaan (K_{vg}), juga diperhitungkan faktor lain yang berpengaruh dan sudah dilaporkan dalam literatur. Faktor tersebut yaitu ketebalan *liquid film* (δ) di permukaan disk dan komponen kecepatan kontak di RBC.

Dalam penelitian ini, dibangun model empirik untuk memprediksi transfer oksigen fisik (K_{La}) di RBC dengan menggunakan Analisis Dimensi metoda *Buckingham-f*. Dipilih metoda Analisis Dimensi karena metoda ini dipergunakan bila variabel-variabel yang mempengaruhi suatu gejala fisik suatu fenomena diketahui, tetapi hubungan antara satu dengan yang lainnya belum diketahui. Selain model empirik Analisis Dimensi, untuk visualisasi hidrodinamika aliran, dalam penelitian ini menggunakan pendekatan berbasis CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Dalam penelitian ini, dirumuskan beberapa permasalahan yang akan dikaji penyelesaiannya dalam riset disertasi ini, sebagai berikut:

- 1 Bagaimana pengaruh kekasaran permukaan (K_{vg}) dan komponen kecepatan media kontak (ω_R , dan ω_H) terhadap ketebalan *liquid film* yang menempel di disk (δ) dan transfer oksigen fisik (K_{La}) di RBC?
- 2 Bagaimana persamaan ketebalan *liquid film* yang menempel di disk (δ) dan transfer oksigen fisik (K_{La}) di RBC?
- 3 Bagaimana menentukan pilihan mekanisme transfer oksigen fisik (K_{La}) di RBC?

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan transfer oksigen di RBC, dengan memasukkan faktor kekasaran permukaan di disk sebagai kontaktor. Adapun tujuan khusus dalam penelitian ini, meliputi :

1. Mengevaluasi pengaruh kekasaran permukaan (K_{vg}) dan komponen kecepatan media kontak (ω_R dan ω_H) terhadap ketebalan *liquid film* (δ) dan transfer oksigen fisik (K_{La}) di RBC
2. Membangun persamaan ketebalan *liquid film* yang menempel di disk (δ) dan transfer oksigen fisik (K_{La}) di RBC.
3. Mengetahui mekanisme transfer oksigen fisik (K_{La}) di RBC.

1.4 MANFAAT PENELITIAN

Manfaat dari penelitian adalah,

- 1 Memberikan informasi tentang tebal *liquid film* dan besarnya nilai transfer oksigen pada permukaan yang tidak ditentukan sebagai licin hidraulik
- 2 Memberikan informasi efisiensi pemilihan variasi bentuk permukaan kontaktor dan sistem pengoperasiannya di RBC dalam pengolahan limbah cair.

1.5 RUANG LINGKUP

Ada beberapa batasan pada penelitian ini, yang meliputi :

- 1 Geometri RBC dibuat tetap, kecuali pada material dan permukaan disk.
- 2 Penelitian ini menggunakan air bersih (*aquadest*)
- 3 Parameter yang diuji adalah dissolved oxygen (DO) di *bulk reactor*, tidak menguji parameter lain, seperti nitrogen, phosphat dan lain-lain juga reaksi pada parameter tersebut
- 4 Reaktor dikondisikan *clean disk* tanpa *biofilm*, sehingga difusi oleh mikroorganisme tidak ada, agar transfer oksigen mencapai 100% *saturasi*.
- 5 Faktor kekasaran permukaan disk, yang diteliti terbatas pada variasi material, *novotex* dan *acrylic* dengan kontur berbentuk kotak posisi radial, dengan memvariasi lebar ‘jurang’ dan ‘gunung’.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. ROTATING BIOLOGICAL CONTACTOR (RBC)

RBC (*Rotating Biological Contactor*) adalah salah satu teknologi pengolahan limbah cair secara biologis. Pengolahan limbah secara biologis adalah dengan memanfaatkan mikroorganisme untuk menguraikan kandungan zat pencemar lingkungan di air limbah. RBC terdiri dari satu seri kontaktor berbentuk disk yang berputar dalam wadah semi sirkuler. Jarak antar disk satu dengan yang lain cukup dekat dan sebagian dari luas disknya terendam dalam air limbah,

Gambar 2.1.



Gambar 2.1. RBC, *Contoured Disc Tertutup Biofilm* (Hendrasarie *et al.*, 2014)

Cara kerjanya, air limbah dimasukkan secara teratur kedalam bak RBC kemudian disk diputar perlahan-lahan. Melalui proses ini mikroorganisme akan tumbuh dan membentuk lapisan pada permukaan cakram, yang disebut *biofilm*. *Biofilm* ini akan tumbuh dan menempel pada permukaan disk dalam bentuk lendir. Mikroorganisme inilah yang akan melakukan penguraian (*decomposition*) dan menghilangkan kandungan organik dari air limbah. Pada saat berputar bagian disk yang tercelup air akan menguraikan zat organik yang terlarut dalam air. Pada saat kontak dengan udara, *biofilm* akan mengabsorpsi oksigen sehingga akan tercapai kondisi aerob.

2.2. KOEFISEN TRANSFER OKSIGEN

Koefisien perpindahan transfer oksigen (K_{La}) merupakan tingkat kemudahan suatu massa senyawa oksigen untuk berpindah dari fase gas ke fase

yang *liquid*. Koefisien perpindahan massa keseluruhan dapat ditentukan dengan dua cara, yaitu dari perhitungan dan eksperimen (Mirwan, 2013). Adapun K_La adalah kecepatan spesifik dari perpindahan massa yang dinyatakan dalam banyaknya konsentrasi suatu zat yang terdegradasi per unit waktu, per unit luas kontak, per unit beda konsentrasi. K_La bergantung pada sifat fisik dari sistem dan dinamika fluida.

RBC dalam prosesnya menggunakan sistem pencampuran karena perputaran disk sebagai kontaktor, yang efisien untuk mencampur seluruh fase cairan di reaktor (Boumansour *et al.*, 1998). Untuk itu pada fase *liquid* ini dituliskan kesetimbangan transfer oksigen pada *liquid* tanpa kehadiran biomass. Kecepatan transfer oksigen secara langsung setara dengan perbedaan antara konsentrasi *actual liquid phase* berdasarkan waktu (C_t , mg/L pada t , menit) dengan konsentrasi kesetimbangan oksigen di cairan (C_s , mg/L). Karena area *interface* sulit ditentukan, koefisien transfer oksigen volumetrik secara keseluruhan, K_La (menit^{-1}) digunakan untuk memprediksi profil oksigen didalam sistem, yang disebut konsentrasi *dissolved oxygen* (DO), dengan konsentrasi DO awal (C_0 , mg/L). Maka persamaan yang digunakan untuk pencampuran sempurna di reaktor :

$$\frac{dC}{dt} = K_La(C_s - C)$$

$$\frac{dC}{(C_s - C)} = K_La \cdot dt \dots\dots\dots (2.1)$$

Integrasi persamaan 1, dan jika $C = C_0$ pada $t = 0$, konstanta integrasi nilainya $-\ln(C_s - C)$ sehingga

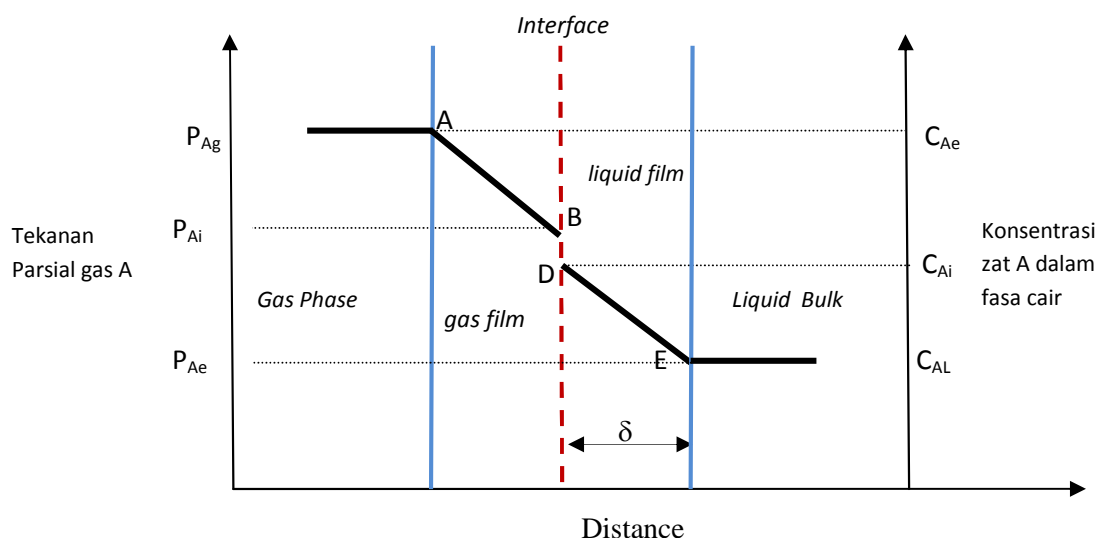
$$\ln(C_s - C_t) = \ln(C_s - C_0) - K_La \cdot t \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\ln \frac{C_s - C_0}{C_s - C_t} = K_La \cdot t$$

Dari data percobaan dengan konsentrasi awal C_0 dan konsentrasi oksigen dalam interval waktu percobaan C_t , maka dapat diplot $\ln((C_s - C_0) / (C_s - C_t))$ vs t , maka diperoleh garis lurus dengan besarnya sudut arah (*slope*) adalah K_La .

Konsep sederhana dari proses gas transfer pada *stationary boundary layer theory*. Gambaran dari konsep Persamaan 2.2, ditunjukkan dalam **Gambar 2.2**. Dalam **Gambar 2.2**. diasumsikan bahwa tahanan pada perpindahan gas berada

dalam *fixed gas film* dan *fixed liquid film* pada antar *interface* gas – cair. Perpindahan gas melintasi *interface* lapisan gas menunjukkan adanya gradien tekanan dalam lapisan gas, oleh sebab itu tekanan gas pada *interface* (P_{Ai}) lebih rendah dari tekanan *bulk gas* (P_{Ag}). Perpindahan gas terjadi dalam dua langkah, yaitu (1) Perpindahan dari tekanan gas (P_{Ag}) ke *interface*, dengan tekanan parsial gas (P_{Ai}), selanjutnya dikonversi ke fase *liquid* dengan konsentrasi C_{Ai} . (2) Transformasi dalam fase cair ke *bulk liquid* (C_{AL}). Perpindahan ini dapat terjadi dalam dua arah tergantung pada perbedaan konsentrasi (C_{AL}) dan C_{Ai} . Jika $C_{AL} > C_{Ai}$ dan $P_{Ai} > P_{Ag}$ maka terjadi pelepasan gas dari fase cair ke fase gas, demikian sebaliknya. Konsep diatas, diprediksi dengan hukum Henry, C adalah konsentrasi dari *bulk gas* menuju cairan, δ adalah ketebalan *liquid film* (*boundary layer*), dan C_{AL} konsentrasi gas pada *bulk liquid*.



Gambar 2.2. Skema Transfer Gas Melalui *Interface* (Benefield & Randall, 1980)

Dari fenomena di atas, $K_L a$ menunjukkan sebuah perhitungan untuk mekanisme yang bervariasi untuk menentukan transfer oksigen. Pada kondisi turbulen, seringkali interface ini terganggu dan tidak terlalu tebal, sehingga laju difusi gas menjadi lebih cepat melewati *interface* ini. (Ramaswami *et al.*, 2005)

2.3. TRANSFER OKSIGEN FISIK DI RBC

Dari mekanisme diatas, ditunjukkan bahwa kecepatan perubahan konsentrasi *dissolved oxygen* (DO), secara langsung dipengaruhi oleh luas area kontak phase gas dan cair di daerah *interfacial*, penurunan konsentrasi oksigen

($C_s - C$) dan ketebalan *liquid film* (). Untuk itu, ada banyak faktor yang berpengaruh pada parameter diatas yang akan mempengaruhi transfer oksigen, yaitu : karakteristik zat yang akan difusi (kejenuhan oksigen), karakteristik air, temperatur, dan derajat turbulensi (Benefield dan Randall,1980).

1. Kejenuhan oksigen

Konsentrasi jenuh oksigen dalam air tergantung pada derajat salinitas air, suhu, dan tekanan parsial oksigen yang berkontak dengan air. Eckenfelder dan O'Connor dalam Benefield dan Randall (1980) menyarankan bahwa konsentrasi jenuh dapat ditentukan dari persamaan :

$$(C_s)_{760} = \frac{475 - 2.65 S_d}{33.5 + T} \dots\dots\dots (2.3)$$

Nilai konsentrasi jenuh gas pada **Persamaan 2.3** dapat dikoreksi untuk tekanan udara barometrik dengan persamaan:

$$C_s = (C_s)_{760} \frac{P - \bar{p}}{760 - \bar{p}} \dots\dots\dots (2.4)$$

Tabel 2.1 Tekanan jenuh uap air (\bar{p}) yang berkontak dengan udara

Suhu	Tekanan uap (mmHg)
0	4,5
5	6,5
10	9,2
15	12,8
20	17,5
25	23,8
30	31,8

Sumber : Benefield dan Randall (1980)

2. Karakteristik Air

Parameter fisik dari karakteristik air yang berpengaruh pada sistem difusi, meliputi densitas (ρ), viskositas dinamik (μ) dan tegangan permukaan (σ).

3. Temperatur

Koefisien transfer oksigen K_{La} , meningkat seiring dengan kenaikan suhu, karena suhu dalam air akan mempengaruhi tingkat difusi, tegangan permukaan dan kekentalan air. Ketika gelembung-gelembung udara bertambah banyak

maka perubahan temperatur pada cairan juga mempengaruhi ukuran gelembung udara yang dihasilkan oleh sistem.

Kemampuan difusi oksigen meningkat dengan peningkatan suhu, sedang tegangan permukaan dan kekentalan menurun seiring dengan kenaikan suhu. Pengaruh suhu pada berbagai faktor tersebut dirangkum dalam persamaan sebagai berikut : (Eckenfelder, 1990)

$$(K_La)_T = (K_La)_{20^\circ C} \cdot \theta^{(T-20)} \dots\dots\dots (2.5)$$

Berdasarkan penelitian Rittmann *et al.* (1983), dalam penelitiannya, koreksi temperatur di RBC untuk nilai K_La tergantung pada kecepatan putaran disk. Alasannya, karena pengaruh putaran, mekanisme kontrol kinetika transfer juga berubah. Dalam penelitiannya nilai θ di RBC tidak disarankan 1.024. Dilanjutkan dalam penelitian Boumansour *et al.*, 1998, dalam penelitiannya menentukan nilai $\theta = 1.015$ untuk kecepatan putaran lebih dari 7 rpm.

4. Derajat Turbulensi

Derajat turbulensi mempengaruhi kecepatan transfer oksigen. Turbulensi menurunkan derajat tahanan *liquid film*, meningkatkan laju perpindahan massa oksigen.

2.3.1. Mekanisme Transfer Oksigen Berdasarkan Literatur

Terdapat 3 pendekatan untuk menentukan mekanisme transfer oksigen fisik, berdasarkan literatur. Pendekatan pertama difusi oksigen melalui gerakan *liquid* di *bulk reactor*, yang kedua difusi oksigen melalui *liquid film* di disk saat terpapar di udara dan yang ketiga menggabungkan kedua pendekatan.

2.3.1.1. Mekanisme Transfer Oksigen Fisik Melalui Gerakan Liquid di Bulk Reactor

Pendekatan yang pertama melalui gerakan *liquid* di *bulk reactor*, pendekatannya menggunakan hubungan antara K_La dengan *Reynolds Number*, *Froud Number* dan faktor *Imersi*, Ouano (1978) melakukan pendekatan dengan *Reynolds Number* yang dihubungkan dengan luas total interface *gas – liquid*, dan luas disk yang kontak dengan udara.

Boumansour *et al.*, merumuskan transfer oksigen melalui turbulensi dengan analisis dimensi, dipengaruhi oleh *Sherwood number*, merupakan perhitungan dari *Reynolds Number*, *Froude Number* dan faktor imersi.

2.3.1.2. Mekanisme Transfer Oksigen Melalui *Liquid Film* di Disk

Dalam sistem pengolahan dengan menggunakan RBC, sejumlah disk sebagai media kontak digabung pada satu *shaft* horizontal. Disk tersebut sebagian tenggelam didalam air, sehingga pada saat rotasi, *liquid film* (δ) terbawa oleh permukaan disk ke atas sehingga terjadi kontak antara *liquid film* dengan fase gas. Setelah putaran bergerak ke bawah *liquid film* diterima oleh air yang dilaluinya. DO di reaktor berpengaruh pada efisiensi kerja alat, DO didapatkan dari perputaran disk, sehingga terjadi pencampuran dari udara terdifusi kedalam cairan Kim dan Molof, 1982).

Yamane dan Yoshida (1972), adalah satu dari beberapa peneliti yang fokus pada karakteristik *physical mass transfer* yang menembus *boundary layer* di RBC, dengan menggunakan kecepatan putaran tinggi. Menyatakan bahwa kecepatan putaran *liquid film* diasumsikan sama dengan kecepatan putaran disk dan terjadi pencampuran yang sempurna *liquid film* menuju cairan di reaktor dalam sekali putaran perlintasan.

Bintanja *et al.* (1975), yang kemudian pertama kali meneliti transfer oksigen dengan kecepatan putaran yang rendah. Diasumsikan bahwa diatas permukaan disk terbentuk *liquid film* yang ketebalannya seragam (), berasal dari pengadukan air yang melaluinya. Waktu kontak rata-rata (t_R) antara udara dan *liquid film* selama satu putaran, didefinisikan tergantung pada *angular velocity* dan kedalaman disk. Kecepatan *film* diasumsikan sama dengan kecepatan disk. Didapatkan secara eksperimental, nilai K_L 49%-87% dari nilai K_L secara teori.

Dilanjutkan Zeevalkink *et al.* (1979), menjelaskan deviasi dari model matematis Bintanja *et al.*, 1975, menganggap reaktor tidak tercampur sempurna dengan oksigen, berdasarkan penelitiannya tahun 1978, Zeevalkink menentukan *liquid film thickness* () menggunakan persamaan Navier-Stokes dan juga memverifikasi rumus tersebut dengan penelitian di laboratorium. Untuk air bersih,

pada viskositas yang rendah, diasumsikan ketebalan *liquid film* adalah seragam, artinya adalah sama pada seluruh permukaan disk dan kecepatannya sama.

Kim dan Molof (1982), mengasumsikan bagaimana transfer oksigen terjadi di sistem RBC berdasarkan mekanisme :

1. Absorpsi oksigen melalui *liquid film* yang tergeret disk terpapar di udara.
2. Transfer oksigen langsung melalui turbulensi akibat perputaran disk.
3. Absorpsi oksigen langsung oleh biofilm

2.3.1.3. Mekanisme Transfer Oksigen Melalui Gerakan *Liquid* di *Bulk Reactor* dan *Liquid Film*

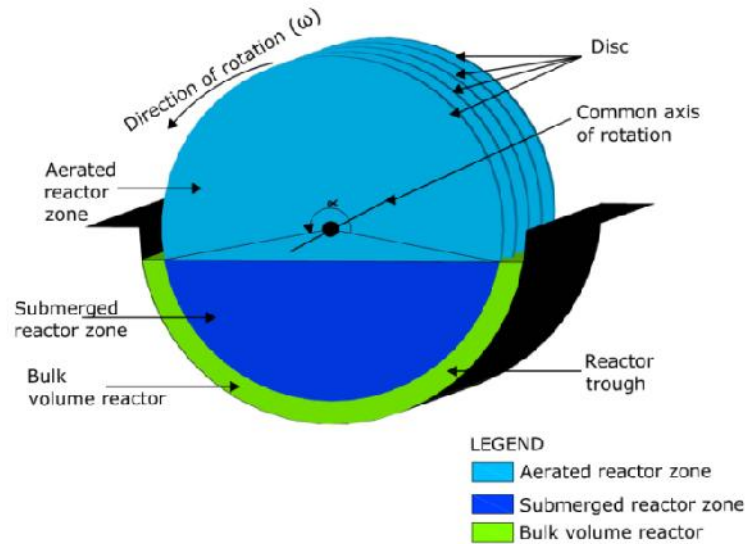
Rittmann *et al.*, (1983), menganalisa bahwa turbulensi cairan bertambah dan kecepatan putaran berkurang. Mengasumsikan dua fenomena untuk transfer oksigen. Membuat sebuah model, untuk dua fenomena transfer oksigen, yaitu K_{La_d} dan K_{La_t} , karena turbulensi dan difusi *film*, yang berkaitan dengan parameter fisik. K_{La_t} diuji dengan mengatur kecepatan putaran disk dibuat tinggi agar terbentuk turbulensi. K_{La_t} didapat dari fraksi *full power* dari *propeller mixer*. Dan K_{La_d} diuji dengan mengatur kecepatan rendah.

Penentuan K_{La} pada RBC dengan tiga *stage*, *clean flat disc*, tahun 2008 dilanjutkan oleh Mukherji. Mereka membuat tiga reaktor dengan geometri reaktor yang berbeda-beda mewakili reaktor-reaktor yang digunakan peneliti sebelumnya. Dengan menggunakan Analisa Dimensi untuk mengembangkan model yang memprediksi nilai K_{La} . Didapatkan nilai K_{La} dan K_{La_t} bertambah jika nilai ω bertambah. Nilai K_{La} total, adalah akumulasi dari nilai $K_{La_t} + K_{La_d}$, dimana nilai K_{La_d} didapatkannya dari rasio ketebalan *liquid film* dengan volume reaktor. Dari perhitungannya yang menggunakan analisa dimensi, didapatkan ada pengaruh K_{La_d} terhadap total K_{La} , tetapi pengaruhnya kecil. Hanya saja model yang dikembangkannya hanya sesuai untuk kedalaman disk 50%, sehingga untuk meninjau pengaruh kedalaman disk, terhadap nilai K_{La} kurang mewakili.

2.4. KONSEP DASAR PEMIKIRAN TEORITIS

Sebelum menentukan model transfer oksigen yang dapat diaplikasikan pada reaktor RBC, diperlukan evaluasi untuk komposisi reaktor. Menurut Prins dan Pretorius (1987), Suga dan Boongorsrang (1984), reaktor RBC terbagi

menjadi tiga zona reaksi yang berbeda, yaitu : *Aerated zone*, *Bulk reaction zone* dan *Submerged zone*.



Gambar 2.3. Konfigurasi RBC (Prins & Pretorius,1987)

Aerated Reactor Zone

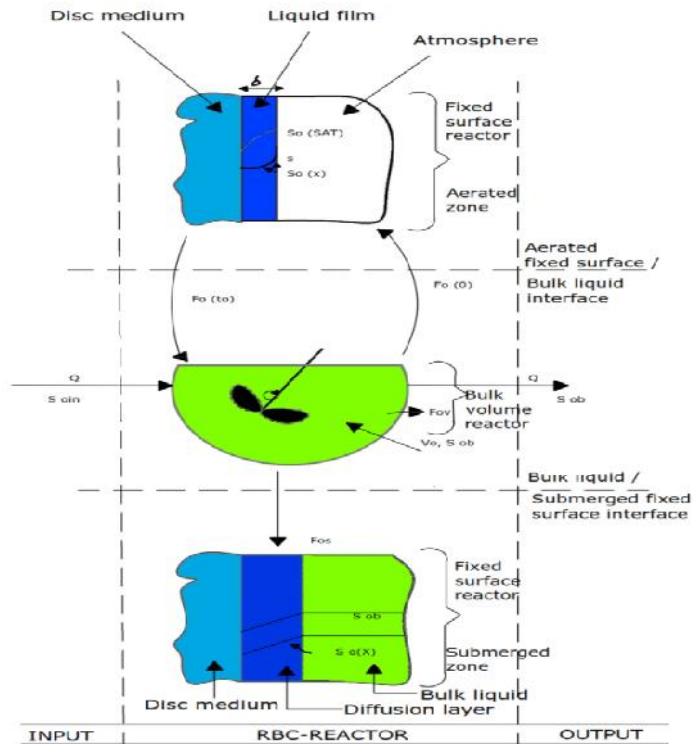
Ketika disk keluar dari permukaan air di reaktor, akan membawa sejumlah air yang membentuk *liquid film*. Di *aerated zone* oksigen akan terdifusi dari udara menuju *liquid film* di disk. Sehingga terjadi transfer oksigen dari permukaan bebas menuju cairan yang dilewatinya.

Gaya tekan dari udara ambien menuju *liquid film* di disk saat keluar dari *bulk liquid*, berhubungan dengan perbedaan konsentrasi oksigen pada saat kesetimbangan antara udara ambien dan konsentrasi oksigen rata-rata dalam *liquid film*. Dalam zona ini, difusi oksigen melalui *liquid film* di disk yang terpapar di udara, yang disebut $K_L a_d$

Bulk Volume Reactor

Ketika disk masuk kembali kedalam air di reaktor, oksigen dari *liquid film* bercampur dengan *bulk liquid* di reaktor. Di dalam *bulk liquid*, *non permanent liquid film* segera terpisah dari disk dan bercampur dengan *bulk liquid*. Dan terjadi pencampuran sempurna, sehingga konsentrasinya sama.

Dalam zona ini transfer oksigen karena pengaruh turbulensi ($K_L a_t$) berdasarkan Mukherji *et al.*, (2008) didominasi oleh geometri alat dan komponen kecepatan kontak.



Gambar 2.4. Skematik Hubungan Ketiga Zona Di RBC (Prins & Pretorius,1987)

Keterangan Gambar : $S_o(SAT)$ = dissolved oxygen (DO) jenuh di udara (M/L)
 $S_o(x)$ = konsentrasi oksigen jarak x di *liquid film* (M/L)
 δ = *liquid film* (L)
 $F_o(o)$ = Flux massa oksigen menuju *aerated zone* (M/T)
 $F_o(to)$ = Flux massa oksigen menuju *bulk liquid* (M/T)
 F_{os} = Flux massa oksigen menuju *submerged zone* (M/T)
 Q = debit (L^3/T)
 V_o = volume di *bulk rector* (L^3)

Submerged Reactor Zone

Pada zona ini, terbentuk *liquid film boundary layer* (δ_{SZ}) karena perputaran disk didalam air. Mekanisme δ_{SZ} di *submerge reactor zone*, dikenalkan pertama kali oleh Suga dan Boongorsrang (1984). Formasi *boundary layer* ini dihasilkan dari percampuran *liquid film* yang melalui fase *submerge*. Menurut Zeevalkink *et al.* (1978), mengacu pada teori Schlichting, (1968). Ketebalan *liquid boundary layer* (δ_{SZ}) di bawah permukaan air lebih besar daripada *liquid film* (δ_{AZ}) di atas permukaan air.

$$\delta_{SZ} \approx 5 \left(\frac{\nu 2\theta r}{\omega r} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (2.6)$$

Dengan : δ_{SZ} = *liquid film* yang terbentuk akibat putaran disk di dalam air

ν = Viskositas kinematik (m²/detik)

θ = arccos (H/r)

Sehingga didapatkan dari penelitiannya, nilai $\delta_{SZ} > \delta_{AZ}$, untuk semua nilai r dan H. Perbedaan ini bertujuan untuk menentukan bahwa ada perbedaan nilai $K_L a$ pada saat disk terekspose di udara dan di *submerge zone* (Suga *et al.*, 1984). Di zona ini, diperhitungkan nilai $K_L a_r$.

2.4.1. Faktor Turbulensi di RBC

Parameter yang berpengaruh pada transfer oksigen melalui gerakan *liquid* di *bulk reactor*, sehingga menghasilkan turbulensi meliputi :

2.4.1.1. Hidrodinamika Aliran Air

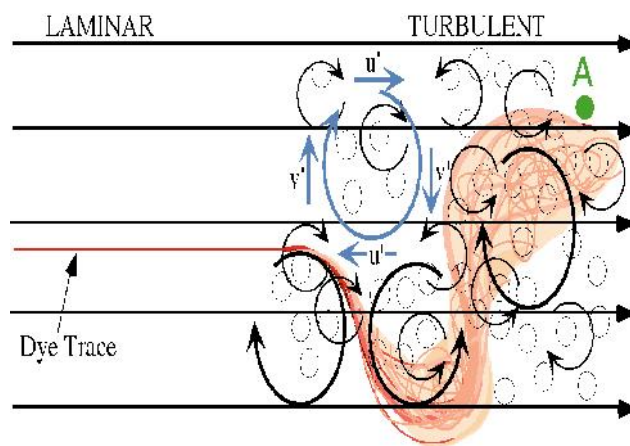
Hidrodinamika aliran khususnya zat cair yang tidak dapat ditekan (*incompressible liquid*) dipengaruhi oleh faktor eksternal dan internal. Faktor eksternal yang perlu diperhitungkan adalah faktor turbulensi (Treybal, 1984; Cahyana, 2005). Pada kebanyakan operasi perpindahan massa, aliran turbulen diperlukan untuk meningkatkan laju perpindahan massa per satuan luas yang dinyatakan dengan Bilangan Reynolds, N_{Re} . Bilangan Reynolds diekspresikan sebagai rasio gaya inersia dan gaya kekentalan. Bilangan Reynolds yang besar mengindikasikan bahwa gaya inersia lebih signifikan dari pada gaya viskositas. Aliran turbulen terjadi apabila gaya-gaya kelembaman relatif sangat besar dibandingkan dengan gaya kekentalan sehingga aliran dikuasai oleh gaya Inersia, sehingga bilangan Reynolds yang dominan. Dibawah ini, dijelaskan nilai bilangan Reynolds di RBC (Ouano , 1978)

$$Re = \frac{F_I}{F_v} = \frac{\rho^2 \omega r}{\mu} \dots\dots\dots (2.7)$$

Faktor turbulensi juga dipengaruhi oleh bentuk permukaan dan pengadukan (Anggrahini, 2005).

a. Turbulensi Akibat Bentuk Permukaan

Pada bidang permukaan yang kasar, aliran transisi berubah menjadi aliran turbulen, hal tersebut dapat terjadi pada bilangan *Reynolds* yang rendah. Hal ini digambarkan pada **Gambar 2.5**. Pada aliran laminar, partikel air secara tepat mengikuti aliran air, hal ini ditunjukkan pada garis *dye trace* pada resime laminar. Pada aliran *eddies turbulent*, terdapat berbagai bentuk kondisi aliran. Ketika partikel masuk pada resime turbulen, jejak partikel terpecah mengikuti aliran air rata-rata (*streamline*) dan *vortex* (Burns *et al.*, 20013). *Vortex* yang besar akan membawa partikel melewati *streamline*. *Vortex* yang lebih kecil jejak partikel menyebar (*difusi*).



Gambar 2.5. Transport Partikel Di Aliran Laminer-Turbulen (Cervo *et al.*,2013)

b. Turbulensi Akibat Pengadukan

Didalam sistem reaktor tangki teraduk, turbulensi ditimbulkan oleh putaran pengaduk mekanis. Terjadi pencampuran antar fase *gas-fluid-solid* yang dibangkitkan oleh disk sebagai *impeller* untuk menimbulkan aliran turbulen. Sehingga meminimalkan gradien suhu dan konsentrasi, dan meningkatkan kontak antar senyawa-senyawa yang bereaksi. Transformasi bahan-bahan yang bereaksi terjadi pada skala molekuler, sehingga proses ini sangat bergantung pada kontak atau senyawa-senyawa yang bereaksi dan selanjutnya kontak ini dipengaruhi oleh fenomena pencampuran dalam skala molekuler yang disebut *micromixing*. Secara teoritis meningkatnya kecepatan putaran *impeller* akan menyebabkan bertambah besarnya energi

disipasi yang dihasilkan dari *impeller* sehingga tingkat *micromixing* dalam reaktor semakin tinggi (Baldyga *et al.*, 2001)

2.4.1.2 Konfigurasi Sistem RBC

Konfigurasi sistem yang digunakan untuk desain RBC dan berpengaruh terhadap transfer oksigen, diteliti oleh beberapa peneliti sebelumnya. Dirangkum dalam parameter di bawah ini.

a. Luas Disk (A_d) dan *Interfacial Area* (A_i)

Tanki RBC permukaan atasnya berbentuk persegi sebagai *interfacial area* (A_i) sebagai luas *interface* masuknya oksigen dari udara ke permukaan air. Dan dasarnya berbentuk setengah lingkaran, mengikuti bentuk disk sebagai media kontak. Formasi tersebut bertujuan agar terbentuk aliran turbulen lebih optimal di dalam tanki. Dari penelitian sebelumnya untuk disk dengan permukaan datar, sudah ditetapkan bahwa luas disk berpengaruh terhadap nilai transfer oksigen. Ouano (1978), menjelaskan sebagai berikut :

$$K_L = \frac{V/A_i}{D_L} = K \left(\frac{A}{A_p} \right)^a \left(\frac{\omega^2}{\mu} \right)^b \dots\dots\dots (2.8)$$

Dengan : K_L = koefisien transfer oksigen (10^{-6} m/dt)

A = *wetted area* (m^2)

A_p = *interfacial area* (m^2)

ω = kecepatan putaran (rpm)

Korelasi tersebut, kemudian dikembangkan oleh Boumansur *et al*, 1998, yang menghasilkan rumusan :

$$K_L \frac{\phi}{D_L} = Sh = K \left(\frac{\omega^2 \phi^2 \rho}{\mu} \right)^a \left(\frac{\omega^2 \phi^2}{g} \right)^b \left(\frac{\phi - \phi_o}{\phi} \right)^c \dots\dots\dots (2.9)$$

$$Sh = K Re^l Fr^m YI^n \dots\dots\dots (2.10)$$

Dengan akumulasi Nre , NFr dan YI adalah *Sherwood number* (Sh) Penelitian ini, dilanjutkan oleh Mukherji *et al*, 2008, dengan pendekatan analisis dimensi didapatkannya nilai $K_L a$ adalah :

$$\frac{K_L a \cdot \rho \cdot A_d}{\mu} = \left(\frac{D}{A_d^{0.5}} \right)^a \left(\frac{\rho A_d \omega}{\mu} \right)^b \left(\frac{A_d}{A_t} \right)^c \left(\frac{\delta}{V^{1/3}} \right)^d \dots\dots\dots (2.11)$$

Dari **Persamaan 2.11.**, *Sherwood number* tidak terlihat berpengaruh secara langsung, hal ini disebabkan penelitian Mukherji *et al*, 2008 ini tidak meneliti pengaruh kedalaman disk. Sehingga rumus yang dihasilkan, hanya berlaku untuk kedalaman disk 50%.

Pada dekade terakhir, mulai dipikirkan memperluas permukaan media kontak. Pada penelitian sebelumnya, untuk memperluas media kontak, diameter disk dibuat besar. Tetapi berpengaruh pada cepat ausnya as sebagai penghubung disk dengan motor. Untuk itu pada dekade terakhir, mulai dikembangkan bahan dan bentuk media, yang bertujuan memperluas media kontak. Beberapa penelitian yang memodifikasi media kontak untuk diaplikasikan pada pengolahan limbah, yaitu berbentuk pipa (Kargi, 2001), bergelombang (Mba,D., 2003), *packed cake RBC*, (Sirianuntapiboon and Chuamkaew, 2007); *rotating drum* (Sima *et al.*, 2012), *net-like rotating biological contactor* (NRBC) (Chen, 2007), permukaan disk bergerigi-berbelah (Hendrasarie *et al.*, 2014). Modifikasi disk tersebut bertujuan untuk meningkatkan efisiensi kinerja RBC. Hal ini dibuktikan dalam penelitian Hendrasarie *et al.* (2014), yang diaplikasikan pada limbah tahu, COD influen 637.52-2370 mg/l, didapat nilai *Organic Surface Loading* (OSL) sebesar 11.91 sampai dengan 47.33 g/m².hari (Kriteria dari Metcalf & Edy, 2004, 8-20 g/m².hari). Nilai yang melebihi dari desain kriteria untuk disk bentuk datar.

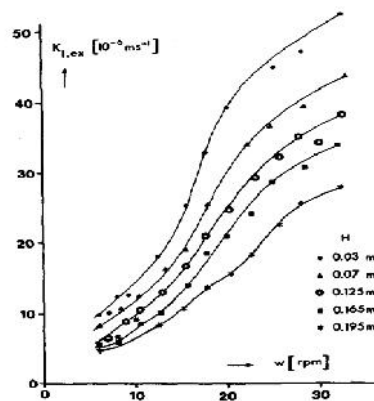
b. Kecepatan Putaran Disk (ω)

Pengaruh kecepatan putaran (ω) pada transfer oksigen fisik di RBC, sudah dijelaskan dari penelitian sebelumnya (Ouano, 1978; Mukherji *et al*, 2008).

Putaran rotor RBC yang makin cepat, menghasilkan oksigen yang makin banyak dalam wadah RBC. Akan tetapi putaran yang lebih cepat mempersulit pembentukan lapisan mikroorganisme, lapisan yang terbentuk juga akan mudah terlepas lagi (Tanaka, 2008). Penelitian dari Ghazimoradi dan James, (2003) jika kecepatan putaran dikisaran dari 3-11 rpm, adalah kecepatan optimal meningkatkan nilai DO (*Dissolved Oxygent*) yang berhubungan langsung dengan mikroorganisme

c. Kedalaman Disk

Kedalaman disk, berpengaruh terhadap transfer oksigen fisik di RBC. Boumansour *et al.*,(1998) sudah menjelaskan dalam rumusannya di **Persamaan 2.10**. Juga peneliti Yamane dan Yoshida,(1972); Bintanja *et al.*,(1975) dan Zeevalkink *et al.*,(1978), sudah melakukan penelitian tentang pengaruh kedalaman disk terhadap nilai K_{La} . Dalam penelitian mereka nilai K_{La} tidak digunakan dalam satuan per menit, tetapi nilai K_L dalam satuan m/dt. Untuk memperjelasnya, hubungan kedalaman disk dengan nilai K_{La} , dapat dilihat di Gambar 2.6 Pengaruh Kedalaman Disk terhadap nilai K_{La} (Zeevalkink *et al.*, 1979)



Gambar 2.6. Hubungan Profil nilai K_L Terhadap ω (Zeevalkink *et al.*,1979)

Luas kontak antara udara dengan air, yang diperhitungkan hanya *wetted area* atau A_w . Untuk mengkonversinya menjadi per-menit seperti dalam penelitian ini, maka harus dikali dengan S . Dan S sebagai rasio A_w dengan volume air.

d. Karakteristik Air

Karakteristik air yang berpengaruh pada transfer oksigen di RBC, meliputi densitas (ρ), viskositas dinamik (μ) dan tegangan permukaan (σ) (Benefield dan Randall, 1980)

2.4.1.3. Difusivitas Molekul Gas di Cairan

Dari mekanisme perpindahan massa, koefisien perpindahan massa akan bergantung pada difusivitas (D_v) serta pada variabel-variabel yang mengendalikan karakter aliran fluida yaitu: laju alir, viskositas, densitas, dan dimensi linier (McCabe *et al.*, 1990).

Difusi yang didasarkan pada modifikasi empirik dilaporkan oleh Wilke-Chang (Reid *et al.*, 1991; McCabe *et al.*, 1990), dimana pada media cair, viskositas sangat tergantung pada temperatur, dengan persamaan :

$$D_v^{\circ} = 7,4 \times 10^{-8} \frac{(\mathbb{E}_B \cdot M_B)^{1/2} T}{\sim_L \cdot V_A^{0,6}} \dots\dots\dots (2.12)$$

Dengan: D_v° = difusi fase cair zat terlarut dan pelarut, cm²/dt

T = temperatur, K

\sim_L = viskositas larutan, cP

V_A = volume molar zat terlarut pada titik didih normal, cm³/gmol

B = parameter asosiasi pelarut (air = 2,26; metanol = 1,9; etanol = 1,5)

M_B = berat molekul pelarut. (BM air = 18 g/gmol)

Sehingga koefisien difusi dalam media air ($D_{j,w}^A$) :

$$D_{j,w}^A = 7.4 \times 10^{-8} T_{air} \frac{\sqrt{2.26 \times BM_{air}}}{\mu_{air} (v_{mol}^A)^{0.6}} \dots\dots\dots (2.13)$$

Dengan : T : suhu lingkungan dalam Kelvin (K)

BM_{air} : berat molekul air dalam gram/mol (18.015289/mol)

μ_{air} : viskositas air dalam centipois (cP)

v_{mol}^A : volume molar zat kimia yang didifusi

$v = M/\rho$; M= massa molar O₂ (32 gr)

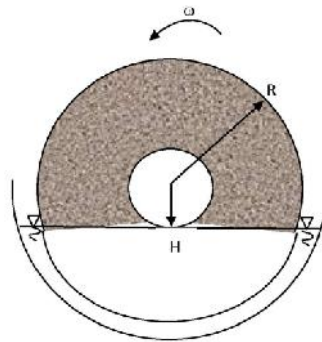
2.4.2. Faktor Ketebalan *Liquid Film* Di RBC

Pada zat cair ideal, aliran melalui *liquid film* mempunyai distribusi kecepatan merata. Sedang pada zat cair riil, karena adanya pengaruh kekentalan, kecepatan di daerah dekat *bidang batas* mengalami perlambatan dan pada *liquid film* kecepatan adalah nol. Lapis zat cair didekat bidang batas dimana pengaruh kekentalan dominan disebut dengan *liquid film*.

2.4.2.1. Profil Ketebalan *Liquid Film* di Permukaan Disk Datar

Menurut Zeevalkink *et al.*, (1978), mengacu pada teori Landau dan Levich, (1942), pada plate yang berputar, ketebalan *liquid film* keseluruhan di bawah permukaan air lebih besar daripada *liquid film* (δ) di atas permukaan air.

Groenveld, 1970 dalam Bintanja *et al.*, 1975, meneliti transfer oksigen dengan kecepatan putaran yang rendah (ω pada kisaran 9.9 – 30.7 rpm). Diasumsikannya bahwa diatas permukaan disk terbentuk *liquid film* yang ketebalannya seragam (), berasal dari pengadukan air yang melaluinya. Waktu kontak rata-rata (t_R) antara udara dan *liquid film* selama satu putaran, didefinisikan tergantung pada *angular velocity* (ω) dan kedalaman disk (I).



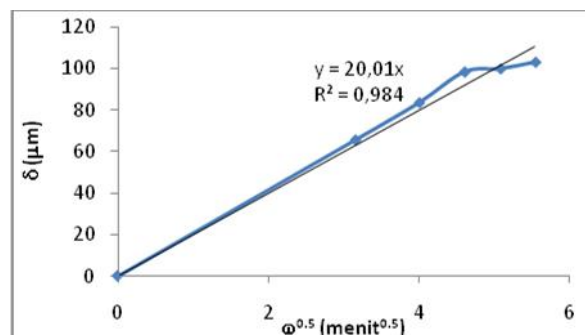
Gambar 2.7. *Rotating Vertically Disc* (Zeevalkink *et al.*,1978)

Kecepatan *liquid film* diasumsikan sama dengan kecepatan disk. Sedangkan ketebalan *liquid film* (δ) yang dihitung sebagai fungsi dari pengaruh gravitasi, profil kecepatan dan parameter fisik dari cairan. Ditunjukkan dalam rumus di bawah ini. Sehingga didefinisikan, bahwa ketebalan *liquid film* (δ) adalah :

$$\delta = K \left(\frac{\mu \omega R}{\rho g} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (2.14)$$

Rumus tersebut di atas, dibuktikan oleh Bintanja *et al.*, (1975) secara experimental, hubungan antara δ dengan $\omega^{0.5}$ adalah linier. Didapatkan data ketebalan *liquid film*, secara experimental dari Bintanja *et al.*, (1975), pada T= 20°C ; $\nu = 1.00 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{detik}$; $g = 9.81 \text{ m/dt}^2$, pada **Gambar 2.8** Data hasil eksperimen Bintanja *et al.*, 1975.

$\omega(\text{rpm})$	$\omega^{0.5}(\text{m}^{0.5})$	$\delta(\mu\text{m})$
0,0	0,000	0,00
9,9	3,154	65,63
16,0	4,000	83,59
21,2	4,600	98,44



25,8	5,077	100,00
30,7	5,538	103,13

(a)

(b)

Gambar 2.8. Hasil Eksperimen Ketebalan *Liquid Film* oleh Bintanja *et al.*, 1975

(a) Data hasil eksperimen; (b) Dalam Bentuk Grafik

Dilanjutkan Zeevalkink *et al.* (1978), untuk menentukan *liquid film thickness* () menggunakan persamaan Navier-Stokes dan juga memverifikasi rumus tersebut dengan penelitian di laboratorium. Diasumsikan ketebalan *liquid film* () dan kecepatannya adalah seragam, artinya adalah sama pada seluruh disk. Dengan menggunakan kecepatan vertikal peripheral disk, yang didefinisikan sebagai fungsi kecepatan putaran dan kedalaman disk. Dengan persamaan:

$$V_c = \omega R \sin \phi \text{ dan } \phi = \arccos (H/R)$$

$$V_c = \omega (R^2 - H^2)^{1/2} \dots\dots\dots (2.15)$$

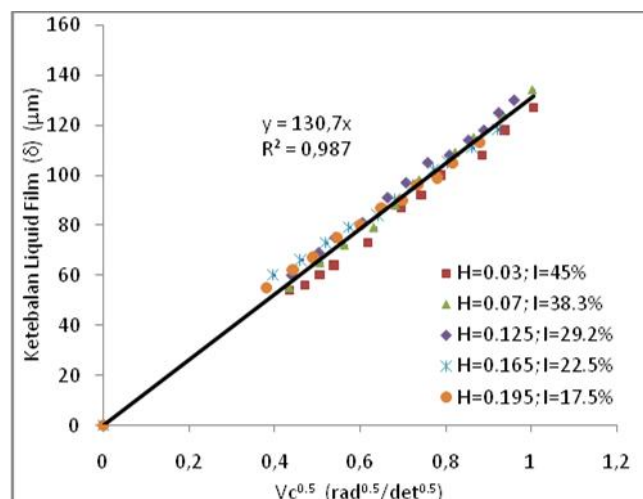
Sehingga didefinisikan, bahwa ketebalan *liquid film* (δ) adalah :

$$\delta = K \left(\frac{\eta V_c}{\rho g} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (2.16)$$

Oleh Zeevalkink *et al.*, (1978) nilai dari hasil eksperimennya didapatkan rumusan ketebalan *liquid film* , yang dihubungkan dengan nilai V_c , adalah :

$$\delta = \frac{4\sqrt{2}}{15} \left(\frac{\eta V_c}{\rho g} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (2.17)$$

Rumus tersebut di atas, dibuktikan oleh Zeevalkink *et al.*, (1978) secara experimental, hubungan antara δ dengan $v_c^{0.5}$ adalah linier. Data profil ketebalan *liquid film*, secara experimental dari Zeevalkink *et al.*, (1978), pada $T = 20^\circ\text{C}$; $\nu = 1.00 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{detik}$; $g = 9.81 \text{ m/dt}^2$. Diameter disk yang digunakan 60 cm dari terbuat dari bahan *polysterene*.



Gambar 2.9. Hubungan δ Dengan $V_c^{0.5}$ (Zeevalkink *et al.*, 1978)

Dari hasil **Gambar 2.9** didapatkan pada $T = 20^\circ\text{C}$; $\nu = 1.00 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{detik}$
 $g = 9.81 \text{ m/dt}^2$, slope yang mendekati 1.2×10^{-4} . Sehingga nilai δ adalah:

$$\delta = 1.2 \nu_c^{1/2} \times (10^{-4} \text{m}) \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

Dalam eksperimennya (Zeevalkink *et al.*, 1978), untuk menentukan ketebalan δ , menggunakan metoda volume. Sejumlah air yang terikutkan disk pada saat terpapar ke udara akibat putaran, diukur dengan spon yang ditempelkan pada disk (sepanjang permukaan yang tidak tercelup air, inilah yang disebut daerah ketebalan *film ultimate*).

Maka rumusannya menjadi :

$$\delta = \frac{M}{\rho\pi(R^2 - H^2)} \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

Debit aliran secara global di disk :

$$Q_w = \frac{\omega M}{2\pi\rho} = \frac{1}{2} \omega\delta(R^2 - H^2) \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

Dengan : M = selisih berat spon (gram)

Penentuan ketebalan *liquid film* pada *rotating vertically flat disk*, dilanjutkan oleh Sanjay (2007), menggunakan *Laser Distance Sensor* untuk mengukur ketebalan *liquid film*. Kecepatan putaran yang digunakannya 20 rpm. Dikatakannya bahwa ketebalan *liquid film* meningkat akibat: kecepatan putaran (ω), *peripheral velocity* (kecepatan pinggir disk) dan *angular disposition* (\emptyset). Dikatakannya peningkatan kecepatan *peripheral* meningkat akibat meningkatnya jari-jari disk (R) dari pusat disk.

2.4.2.2. Faktor Yang Berpengaruh Pada Ketebalan *Liquid Film*

Dalam teori dinamika aliran air khususnya teori lubrikasi, menjelaskan aliran air yang mengalir, memiliki ketebalan lebih tipis dari aliran air lainnya. Faktor yang berpengaruh pada sistem ini adalah :

1. Komponen kecepatan putaran di disk

Pada saat disk berputar secara vertikal, pada saat disk keluar dari permukaan air terdapat banyak hal yang dapat dijelaskan. Pada proses ini, mengalami kecepatan putaran yang bervariasi dari ωH sampai dengan ωR . *Contact angle* (α) bervariasi dari 0 sampai $\arccos(H/R)$.

2. Tegangan permukaan (*surface tension*).

Liquid film di permukaan disk berasal dari permukaan air yang bebas (*free surface*) di reaktor, maka tegangan permukaan (σ) sangat berpengaruh pada permukaan air. Pada umumnya, tegangan permukaan hampir tidak berubah dan dapat diasumsikan konstan (Miah *et al.*, 2016).

Tegangan permukaan, berkaitan dengan *Capillary number*. Tegangan permukaan diperhitungkan jika *Capillary number* (Ca) $\ll 1$. Pada kasus *liquid film* yang mengalir pada disk berputar secara vertikal, nilai Ca sangat kecil (Zeevalkink *et al.*, 1978; Miah *et al.*, 2012)

$$Ca = \left(\frac{\mu U}{\sigma} \right) \ll 1 \dots\dots\dots (2.21)$$

3. *Wetting* dan *Dewetting*

Wetting dan *dewetting* berhubungan dengan *hydrophilic* dan *hydrophobic* suatu permukaan padat. Yaitu interaksi antara permukaan padat dengan fluida, dalam hal ini air, dengan memperhitungkan *contact angle* (Rodd *et al.*, 2003) *Contact angle* untuk *hydrophilic surface*, kurang dari 80° yang diukur pada suhu 20°C (Bico *et al.*, 2001)

4. Gaya *centrifugal* dan Gaya Viskositas

Ketebalan *liquid film* akibat pengaruh gaya *centrifugal* dan gaya viskositas. Pada kecepatan yang sangat rendah ($\omega < 5$ rpm) gaya viskositas mendominasi dan mengurangi variasi ketebalan *liquid film* (Miah *et al.*, 2016)).

5. Gaya Gravitasi

Pengaruh gaya gravitasi mendominasi, saat *liquid film* yang terbentuk di puncak disk, menjadi berkurang akibat gaya geser berkurang. Gaya grafitasi mendominasi saat *liquid film* turun kembali menuju permukaan air (Zeevalkink *et al.*, 1978, Afanasiev *et al.*, 2008)

2.4.2.3. Profil Ketebalan *Liquid Film* di Permukaan Disk Berkontur

Pada bidang permukaan berkontur, aliran transisi berubah menjadi aliran turbulen, hal tersebut dapat terjadi pada bilangan *Reynolds* yang rendah (Schlichting, 1968). Nikuradse, (1950) dalam Cervo *et al.*, (2013), mempelajari pengaruh tekstur permukaan pada profil kecepatan aliran. Dicontohkannya kekasaran pasir yang *uniform* diameternya (ϵ) pada sebuah permukaan, yang diukur profil kecepatannya, mengalami kecepatan yang berbeda. Mengacu pada Anggrahini (2005), untuk kecepatan rata-rata pada *wall roughness*, terdapat tiga resime. Tiga resime tersebut berdasarkan penelitian Nikuradse, dengan kondisi aliran mengalir horizontal.

- Resime licin hidraulik : $z_0 = 0.11 (\vartheta/u_*)$ untuk $\frac{u_* K_s}{\vartheta} \leq 5$ (2.22)

Disini elemen kekasaran jauh lebih kecil daripada tebal lapisan *viscous* (δ_s)

- Resime kasar hidraulik : $z_0 = 0.033 K_s$ untuk $\frac{u_* K_s}{\vartheta} \geq 70$

Dalam hal ini, lapisan viscous sangat tipis sekali dan diagram pembagian kecepatan tidak tergantung kekentalan cairan (ϑ)

- Resime transisi hidraulik : $z_0 = 0.11 (\vartheta/u_*) + 0.033 K_s$ untuk $5 \leq \frac{u_* K_s}{\vartheta} \leq 70$

Dalam hal ini, diagram pembagian kecepatan dipengaruhi oleh kekentalan cairan dan kekasaran dasar saluran.

Dengan : Z_0 = elevasi dari kecepatan nol ($u=0$ pada $z=z_0$)

K_s = tinggi aktual kekasaran permukaan

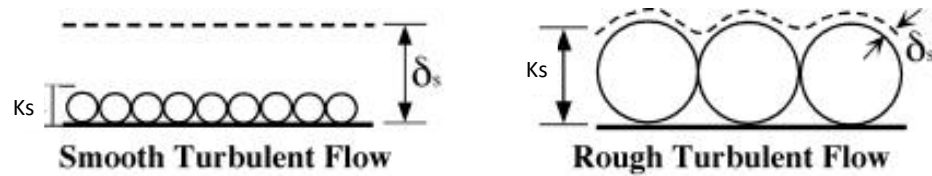
u_* = kecepatan rata-rata, untuk di RBC = $\pi \cdot \omega \cdot D$ (m/dt)

ω = kecepatan putaran disk (rpm)

D = diameter disk (m)

Dari percobaan Nikuradse (dalam Anggrahini, 2005), dibedakan aliran berdasarkan tipe dari resime aliran, seperti di atas.

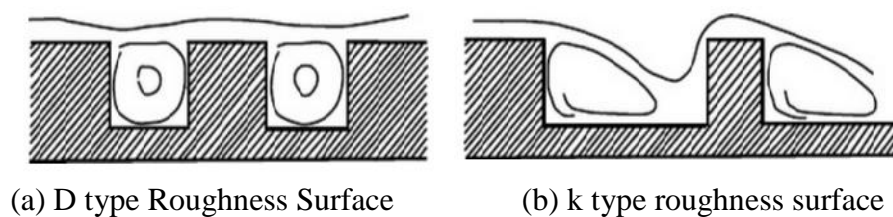
Berdasarkan Gaskell *et al.*, 2004, Terdapat dua perbedaan penting untuk mendefinisikan *roughness number* ($K_s u_*'/\nu$), yang dijelaskan dalam **Gambar 2.10**.



Gambar 2.10. Pembagian Aliran Akibat Permukaan Tidak Licin Hidraulik

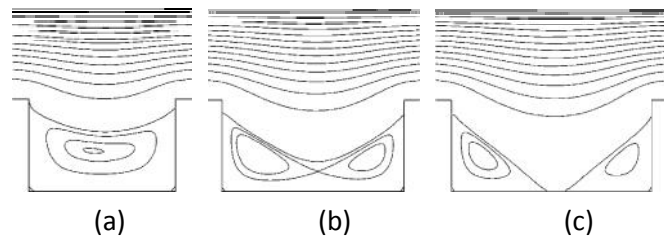
Berdasarkan Schlichting, 1968, *inverse relative roughness* dari pipa (ν/R) disubstitusi menjadi ν/u , dengan u dinyatakan sebagai ketebalan *liquid film*. Perbedaan terpenting aliran yang melalui permukaan kekasaran pipa dan plate adalah kekasaran relatif ν/u berkurang sepanjang *plate*, dengan ν tetap dan u meningkat saat di *downstream*, sedangkan pada pipa nilai ν/R adalah tetap. Hal ini yang menjadikan kekasaran pada *plate* berbeda, karena ada pengaruh gaya *drag*.

Merujuk pada Jimenez, (2004), yang menjelaskan tipe aliran akibat kekasaran, kekasaran tipe D dan tipe K, yang pertama kali dibuat oleh Perry, *et al.*, (1969). Jimenez yang mempelajari *boundary layer* yang melewati bidang permukaan kasar, didapatkan bahwa faktor kekasaran efektif tergantung pada tinggi kekasaran dan ketebalan *boundary layer*. Yang dijelaskan pada **Gambar 2.11**. Tipe permukaan berkontur kotak pada aliran air.



Gambar 2.11. Tipe Permukaan Berkontur Pada Aliran Air (Perry *et al.*, 1969)

Dijelaskan oleh Bico *et al.*, 2001; Gaskell *et al.*, 2004, Guriyanova *et al.*, 2010, tipe aliran air yang melalui permukaan berkontur kotak, mengalami aliran *vortex* dan ketebalan *liquid film* yang berbeda. Pada **Gambar 2.12**. Tipe aliran air pada permukaan berkontur pada variasi kedalaman dan lebar kotak.



Gambar 2.12. Tipe Aliran Air Pada Permukaan Berkontur Dengan Memvariasi Kedalaman dan Lebar Kotak (a) 1.6:1; (b) 2:1; (c) 2.2:1 (Gaskell *et al.*, 2004)

Dari Gambar 2.12, terdapat perbedaan bentuk *vortex* dan ketebalan *film* yang terjadi di ‘jurang’ dari *contoured disc* bentuk kotak. *Vortex* yang terbentuk ini pada aliran air horizontal pada penelitian Gaskell *et al.*, 2004.

2.5. MODEL EMPIRIK ANALISIS DIMENSI

Analisis dimensi yaitu teknik matematika yang berhubungan dengan dimensi dari suatu besaran fisik yang berpengaruh pada model penelitian yang dihadapi. Analisis dimensi dipergunakan bila variabel-variabel yang mempengaruhi suatu gejala fisik diketahui tetapi hubungan antara satu dengan yang lainnya belum diketahui. Untuk sistem yang kompleks, biasanya dideskripsikan dengan analisis bilangan tak berdimensi (*dimensionless number analysis*) dalam bentuk korelasi empirik antar bilangan terhadap variabel-variabel peubah yang berpengaruh (Jordening dan Buchholz, 2005).

Pertamkali diperkirakan parameter-parameter fisik yang mempengaruhi aliran, dan kemudian parameter-parameter tersebut dikelompokkan dalam suatu bentuk tak berdimensi, sehingga akhirnya dapat ditetapkan fenomena aliran yang lebih baik. Analisis dimensi membantu dalam pekerjaan eksperimen dan akan mengarahkan pada sesuatu yang secara nyata mempengaruhi fenomena yang ada.

Dalam suatu persamaan yang menunjukkan hubungan fisis antara besaran-besaran, harus ada kesamaan dimensiional dan numerik yang mutlak. Pada umumnya, semua hubungan fisis seperti itu dapat disederhanakan menjadi besaran-besaran dasar yang terdiri dari : gaya (F), panjang (L) dan waktu (T) (atau massa (M), panjang (L), waktu (T). Keuntungan analisis dimensi adalah dapat dipergunakan untuk beberapa skala sistem (Triatmojo, 2003)

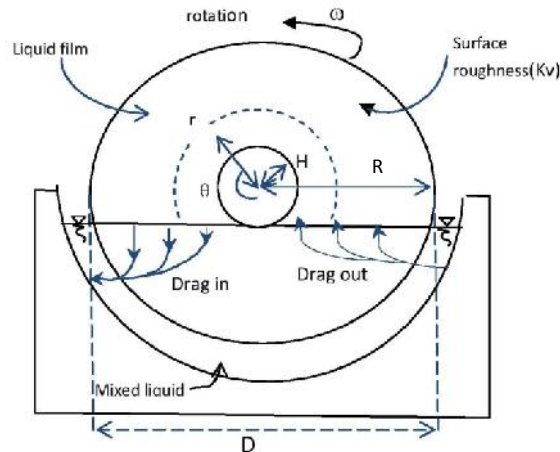
Ada beberapa pendekatan yang digunakan dalam analisis dimensi, dalam penelitian ini, dipilih pendekatan dengan metoda *Buckingham-f Theorem*. Pemilihan metoda *Buckingham f*, karena variabel yang berpengaruh terhadap *liquid film* dan K_{La} di RBC cukup banyak, sehingga diharapkan metoda ini lebih mudah menyelesaikannya.

Beberapa penelitian sebelumnya untuk memodelkan transfer oksigen fisik di RBC menggunakan model analisis dimensi. Ouano (1978), dengan pendekatan analisis dimensi, memodelkan nilai K_L , di **Persamaan 2.8**. Dari **Persamaan 2.8** kemudian dikembangkan oleh Boumansur *et al*, (1998), yang menghasilkan **Persamaan 2.9 dan 2.10**. Penelitian ini, dilanjutkan oleh Mukherji *et al*, 2008, dengan perhatian pada geometri reaktor, didapatkannya prediksi nilai K_{La} pada **Persamaan 2.11**. Penelitian Mukherji *et al*, 2008, belum memperhitungkan kedalaman disk dan kekasaran permukaan, sehingga dalam rumusannya terbatas hanya berlaku untuk kedalaman disk 50%.

Sedangkan peneliti sebelumnya yang memodelkan *liquid film* dengan menggunakan analisis dimensi, dilakukan oleh Miah *et al*, 2016. Penelitiannya menguji karakteristik ketebalan *liquid film* di *flat disc*, dengan *high viscous liquid*, dengan menggunakan model numerik CFD dan analisis dimensi. Digunakan pendekatan numerik CFD untuk mempelajari fenomena aliran dan untuk memprediksi ketebalan *liquid film*, dengan pendekatan analisis dimensi.

2.5.1. Analisis Dimensi Pada Ketebalan *Liquid Film* di Permukaan Disk Datar

Yang menjadi titik perhatian dalam penelitian ini, adalah aliran *liquid film* di disk yang berputar secara vertikal dan tenggelam sebagian di dalam air. Di beberapa literatur (Afanasiev *et al*, 2008; Miah *et al*, 2016; Zeevalkink *et al*, 1977), menjelaskan faktor - faktor yang berpengaruh terhadap ketebalan *liquid film* di RBC : karakteristik air (μ , ρ , σ), jari-jari disk (R), diameter disk (D), kecepatan putaran disk (ω), H (jarak muka air di *bulk* terhadap poros disk). Untuk lebih jelasnya, dilihat pada **Gambar 2.13** di bawah ini, skema aliran *liquid film* di *Rotating Vertically Disc*.



Gambar 2.13. Skematik Aliran *Liquid Film* di RBC

Untuk menganalisa menggunakan analisis dimensi, langkah awal, yaitu menentukan variabel yang berpengaruh dari literatur maupun dari eksperimen. Beberapa variabel dari literatur dan hasil penelitian, dibentuk formasi rumusan, dengan mengkombinasi variabel-variabel tersebut terhadap ketebalan *liquid film*. Formasi-formasi rumusan tersebut, kemudian dianalisa dan diuji dengan menggunakan metoda regresi linier berganda untuk mengurangi kesalahan. Hasil formasi-formasi tersebut yang lolos uji, untuk selanjutnya dianalisa untuk mendapatkan kesesuaian yang paling sesuai antara nilai eksperimental dengan nilai prediksi.

Dari penelitian sebelumnya, telah jelas menunjukkan bahwa aliran *liquid film* keseimbangan gaya-gaya memiliki peranan penting. Gaya-gaya tersebut meliputi gaya viskositas, inersia, gravitasi dan gaya tekanan permukaan yang diberikan pada aliran *film*, pada disk yang berputar. Hal ini juga sudah dikemukakan oleh Miah *et al*, 2016. Dan dibuktikan bahwa gaya viskositas dominan pada daerah *drag out* dan gaya gravitasi di daerah *drag in*.

Selain parameter yang sudah ada diatas, juga diperhitungkan parameter kekasaran permukaan (K_{vg}). Sehingga variabel yang berpengaruh terhadap ketebalan *liquid film* (δ), meliputi : kecepatan putaran (ω), kedalaman disk (H), jari-jari disk (R), diameter disk (D), rasio jarak lebar gunung dengan lebar jurang (di/dt) (pada *contoured disc*), karakteristik air (\sim, \dots, \dagger) dan kekasaran permukaan (K_{vg}). Nilai K_v berkaitan dengan kekasaran permukaan dengan ukuran nano

meter sehingga masih diklasifikasikan licin hidraulis (Anggrahini, 2005). Hal ini berhubungan dengan *contact angle* (θ) yang menunjukkan kondisi *wetting* dan *dewetting*, yang berhubungan dengan sifat *hydrophilic* dan *hydrophobic* suatu permukaan padat. Yaitu interaksi antara permukaan padat dengan fluida. Sedangkan nilai K_g , berkaitan dengan kekasaran permukaan dengan ukuran milimeter, sehingga diklasifikasikan tidak licin hidraulis. K_g dan di/dt , digunakan, pada saat perhitungan ketebalan *liquid film* dengan menggunakan disk bentuk permukaan berkontur. Sehingga dijabarkan sebagai berikut :

$$u_f = f(D, \tilde{S}, H, R, K_{vg}, \dagger, \sim, \dots, di/dt) \dots\dots\dots (2.23)$$

Diasumsikan bahwa :

1. *Liquid film* dipengaruhi oleh gaya centrifugal. Komponen kecepatan *liquid film* dianggap sama dengan komponen kecepatan disk (ωR dan ωH)
2. Tekanan konstan yang melewati *liquid film*
3. Interaksi tegangan geser antara air dan udara (τ_w), di *free surface* diabaikan
4. Gaya gravitasi berpengaruh secara langsung.
5. *Surface tension* (σ) hampir tidak berubah (air bersih), diasumsikan konstan
6. Aliran *liquid* di pinggir disk tidak diperhitungkan

(Zeevalkink *et al.*, 1978; Afanasiev *et al.*, 2008; Miah *et al.*, 2016)

2.5.2. Analisis Dimensi Pada Transfer Oksigen Fisik di RBC

Analisis dimensi dipilih dalam penelitian ini, untuk mengestimasi transfer oksigen di RBC. Dalam penelitian ini, untuk menentukan nilai K_{La} di RBC, dimasukkan parameter kekasaran permukaan (K_{vg}). Penambahan parameter tersebut tujuannya meningkatkan nilai transfer oksigen fisik di RBC. Sehingga, efisiensi kinerja reaktor RBC dapat meningkat.

Dari literatur yang ada, terdapat tiga pendekatan yang digunakan untuk memodelkan transfer oksigen fisik di RBC, berdasarkan metoda analisis dimensi. Pendekatan yang pertama, meninjau dari gerakan *liquid* di *bulk reactor*, maka nilai transfer oksigen yang didapat adalah K_{La_t} yaitu nilai K_{La} dari gerakan *liquid* di *bulk reactor* (Ovano, 1978; Boumansour and Vassel, 1998). Pendekatan yang kedua, nilai K_{La} didasarkan pada *liquid film* yang menempel di

disk saat berputar meninggalkan permukaan air di reaktor. Maka nilai *transfer oksigen* yang didapat adalah K_{La_d} , yaitu nilai K_{La} dari *liquid film*. (Yamane dan Yoshida, 1972 ; Bintanja *et al.*, 1975; Zeevalkink *et al.*, 1979; Kim and Molof, 1982; Kubsad *et al.*, 2004). Pendekatan ketiga, bahwa nilai transfer oksigen adalah akumulasi dari kedua pendekatan di atas (Rittmann *et al.*, 1983; Mukherji *et al.*, 2008)

Maka dalam penelitian ini, digunakan dua skenario yang meliputi: skenario 1, transfer oksigen melalui gerakan *liquid* di *bulk reactor* (K_{La_t}); skenario 2, akumulasi transfer oksigen melalui turbulensi (K_{La_t}) dan dari *liquid film* di disk (K_{La_d})

Pada parameter K_{La_t} , variabel yang berpengaruh pada transfer oksigen sudah diidentifikasi dari literatur. Variabel tersebut meliputi : diameter disk (D), jari-jari disk (R), luas disk (A_d), kecepatan putaran (ω), *interfacial area* bak reaktor (A_t), kedalaman disk (H), viskositas (μ) dan densitas (ρ) air. (Mukherji *et al.*, 2008; Rittman *et al.*, 1983; Boumansour *et al.*, 1985).

Sedangkan pada K_{La_d} , variabel yang berpengaruh pada transfer oksigen melalui *liquid film* yang menempel disk terekpose di udara, dijelaskan oleh Rittmann *et al.*, 1983. Meliputi, viskositas (μ) dan densitas (ρ) air, ketebalan *liquid film* (δ), Luas disk basah (A_w). Model ini, didasarkan pada asumsi: pencampuran di reaktor karena kecepatan putaran disk secara sempurna (Boumansour dan Vassel, 1998).

2.6. MODEL HIDRODINAMIKA ALIRAN, BERBASIS CFD DI RBC

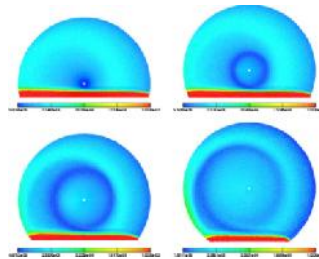
CFD adalah metode komputasi untuk memecahkan berbagai problema yang berkaitan dengan sistem rekayasa fluida, berbentuk gas atau cairan, dimana didalamnya melibatkan pemodelan (matematika dan fisika), serta metode numerik (*solvers, finite differences, grid generations, dll*). Sebagaimana diketahui CFD memiliki kemampuan yang terintegrasi, meliputi *mesh generator, flow solver*, maupun perangkat visualisasi, yang diharapkan dapat memberikan deskripsi tentang mekanisme transfer oksigen fisik di RBC.

Dalam penelitian ini, terdapat dua model yang perlu dilakukan, yaitu : model profil *liquid film* di disk dan model transfer oksigen di RBC

2.5.1. Pemodelan *Liquid Film* di RBC Berbasis CFD

Dalam model profil ketebalan *liquid film* di disk dengan aplikasi CFD, beberapa peneliti ada yang memilih model *finite element method* (FEM) (Afanasiev *et al.*, 2008), dan *volume of fluid* (VOF) (Miah *et al.*, 2016).

Afanasiev *et al.* (2008), dalam penelitiannya, menentukan aliran *liquid film* di permukaan disk adalah laminar. *Liquid* yang digunakan dalam penelitian Afanasiev *et al.* (2008) ini kerapatan airnya lebih kental ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 1 \text{ kg/m.s} = 1 \text{ Pa.s}$, $\sigma = 72.7 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$). Sehingga gaya *viscous* lebih mendominasi. Ketebalan *liquid film*, pada berbagai kedalaman disk, dijelaskan di **Gambar 2.14**.

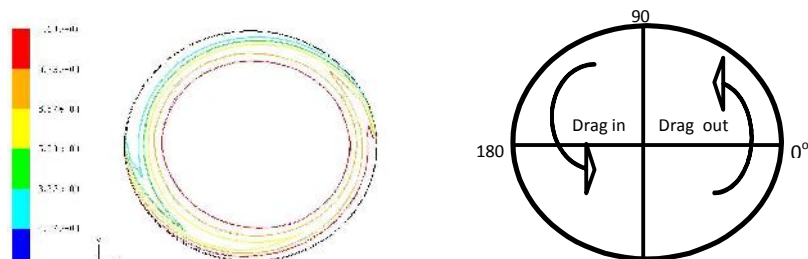


Gambar 2.14. Profil Ketebalan *liquid film* di disk (Afanasiev *et al.*, 2008)

Dijelaskan oleh Afanasiev, bahwa *liquid film* yang menempel disk, didominasi oleh gaya *viscous* dan pada saat turun ke dalam air didominasi oleh gaya gravitasi.

Miah *et al.*, (2016), meneliti karakteristik fluida yang *highly viscous liquid*, dengan karakteristik fluidanya $\rho = 975 - 1000 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 1-10 \text{ kg/m.s}$, $\sigma = 0.0211-72.7 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$, jenis fluidanya *Polydimethylsiloxane Liquid* (PDMS), *silicon*, *seyal* dan *senegal solution*. Dalam simulasinya, ada dua faktor dominan utama mengendalikan profil ketebalan *film* adalah viskositas dan kecepatan *rotasi angular*. Perubahan dari ketebalan *film* dan bentuk dari *film* tipis dapat dikarakterisasi dengan Bilangan *Froude*. Simulasi juga mengindikasikan bahwa peningkatan viskositas menyebabkan ketebalan *film* rata-rata meningkat pula, mengindikasikan Bilangan *Capillary* dan bilangan *Reynolds* menjadi parameter penting. Sebagai tambahan, efek dari tegangan permukaan dalam profil ketebalan *liquid* dapat diindikasikan dari bilangan *Webber*, dimana $We = Re \times Ca$, sehingga dirumuskan $h' = 2.61 Re^{-0.2} Ca^{0.1} Fr^{0.32} (r/R)^{0.36} \theta^{k5} \dots\dots\dots(2.25)$

Di bawah ini **Gambar 2.15** Distribusi ketebalan *liquid film* dari penelitian Miah *et al.*, 2016



(a)

(b)

Gambar 2.15. Distribusi Ketebalan *Liquid Film* (a) Profil Ketebalan *Liquid Film*,
(b) Skema Yang Menunjukkan Aliran *Liquid Film* (Miah *et al.*, 2016)

Profil *Liquid Film* dari **Gambar 2.15**, menunjukkan profil *liquid film* semakin menebal di tengah disk, profil *liquid film* yang sama dihasilkan oleh Afanasiev *et al.*, 2008. Hal ini karena cairan yang digunakan, berviskositas tinggi (Miah *et al.*, 2016)

Persamaan Umum Yang Digunakan Dalam CFD

Pengaturan fisik untuk disk yang berputar secara vertikal yang sebagian tenggelam kedalam air. Sebuah disk dengan radius R dan berorientasi dengan kecepatan ω pada sumbu horizontalnya, dimana jarak dari poros ke permukaan air (H). Untuk itu pada disk yang berputar secara vertikal, digunakan sistem koordinat silinder. Sementara itu vektor kecepatan *liquid* direpresentasikan sebagai (u_r, u_θ, u_z) dan Ω ditunjukkan sebagai vektor *angular velocity* dengan komponen $(0,0,\omega)$.

Persamaan Momentum

Persamaan momentum pada dasarnya merupakan persamaan hukum kekekalan momentum mikroskopis. Persamaan momentum dalam arah sumbu x, y, dan z (persamaan gerak) dimana untuk fluida *incompressible* dan ρ konstan dapat ditulis dalam bentuk-bentuk persamaan Navier-Stokes. Persamaan umum Navier-Stokes digunakan untuk menjelaskan aliran *liquid film* di *rotating vertically disc partially immersed*, tiga dimensi (Afanasiev *et al.*, 2008), dijelaskan dalam **Persamaan 2.26** di bawah ini.

$$\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_\theta^2}{r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \left[\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} - \frac{u_r}{r^2} \right] - g \sin \alpha \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_r u_\theta}{r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_r}{r^2} \right] - g \cos \theta$$

$$\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_r}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 u_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right]$$

Dengan ρ , μ , ν , p merupakan, densitas, viskositas dinamik, viskositas kinematik dan p *pressure* fluida. Gaya luar yang berpengaruh terhadap *liquid film* adalah gaya gravitasi (g).

Persamaan Kontinuitas (Hukum Kekekalan Massa)

Fenomena aliran dapat dimodelkan dengan persamaan matematis yaitu persamaan kontinuitas. Persamaan kontinuitas pada dasarnya merupakan persamaan hukum kekekalan massa mikroskopis. Dijelaskan dalam **Persamaan 2.27** di bawah ini.

$$\frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r u_r) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (2.27)$$

Aliran *liquid film*, sama dengan aliran air lainnya, juga mengikuti hukum kontinuitas, hukum konservasi massa yang tergambarkan dalam koordinat silindris pada **Persamaan 2.27** (Afanasiev *et al.*, 2008)

Metoda Volume of Fluid (VOF)

Dalam penelitian ini, metoda VOF digunakan untuk memvisualisasi aliran *liquid film* di permukaan disk. Karena metode VOF ini sebagai teknik numerik yang sesuai untuk menyelesaikan sebuah sistem, yang terjadi pencampuran antara fase udara dengan fase air. Metoda ini bekerja dengan memperhitungkan volum fraksi di tiap sel pada *fixed eulerian grid*. (Miah *et al.*, 2016).

Faktor yang Mempengaruhi Pembentukan Liquid Film di CFD

Dalam simulasi pembentukan lapisan tipis, faktor yang mempengaruhi antara lain adalah *surface tension* dan *wall adhesion*. *Surface tension* atau gaya tegangan permukaan adalah gaya yang terjadi pada antar muka permukaan fluida yang berperan untuk meminimalisasi luas permukaan pada antar muka. Gaya tegangan permukaan memberikan pengaruh seperti efek kapilaritas pada *adhesive walls*. *Wall adhesion* merupakan suatu parameter yang harus diperhatikan dalam simulasi pembentukan lapisan tipis dengan memasukkan nilai *contact angle*.

Ketika terjadi antar muka antara *liquid* dan *solid*, maka sudutnya dideskripsikan oleh *contact angle* yakni sudut tangensial antara dinding dengan antar muka pada dinding (*interface*). (Afanasiev *et al.*, 2008)

Aliran fluida dipengaruhi oleh bilangan yang tak berdimensi yakni bilangan Reynolds. Jika bilangan Reynolds kecil yang menandakan bahwa aliran fluida bersifat laminar, maka hal yang paling berpengaruh pada *surface tension* yakni bilangan *Capillary* (*Ca*, dijelaskan di bawah ini (Afanasiev *et al.*, 2008)

$$Ca = \frac{\sim V}{\dagger} \dots\dots\dots (2.28)$$

Jika bilangan Reynolds besar, maka hal yang paling berpengaruh pada *surface tension* yakni bialngan *Weber* (*We*).

$$We = \frac{\dots LV^2}{\dagger} \dots\dots\dots (2.29)$$

2.5.2. Pemodelan Transfer Oksigen di RBC Berbasis CFD

Meskipun CFD (*Computational Fluida Dynamics*) telah dipakai secara luas di berbagai bidang ilmu pengetahuan, tetapi visualisasi dengan menggunakan CFD untuk reaktor RBC masih belum ada. Sebagai referensi, digunakan beberapa penelitian yang meneliti transfer oksigen pada bioreaktor lain dengan menggunakan CFD metoda VOF, yaitu Fayolle *et al.*, (2007). Aliran yang ditelitinya dalam katagori turbulen di tanki aerasi dan diasumsikan *transient* (Lamping *et al.*, (2003); Zhang *et al.*, 2009; Fayole *et al*, 2007; Laakkonen *et al.*, 2007; Liow *et al.*, 2008; Littleton *et al*, 2015).

Untuk koefisien volumetric mass transfer (K_L) dihitung berdasarkan teori penetrasi Higbie (1935) (Panneerselvam, 2009) :

$$K_L = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{D_L}{t}} \dots\dots\dots (2.30)$$

Dengan t sebagai *contact time*, yang dihitung oleh Teori Kolmogoroff, pada

$$isotropic turbulence : t = \sqrt{\frac{\nu}{\varepsilon}} \dots\dots\dots (2.31)$$

$$Sehingga \text{ menjadi } : K_L = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{D_L} \left(\frac{\varepsilon}{\nu} \right)^{1/4} \dots\dots\dots (2.32)$$

Dengan : D_L = Difusi *liquid*, menggunakan **Persamaan 2.13**

ε = Kecepatan energi dissipasi (J/kg) diprediksi dari simulasi CFD

ν = Viskositas kinematik (m^2/s) diperoleh dari *property* fisik *liquid*

Difusi ini dimungkinkan karena adanya perbedaan konsentrasi oksigen pada batas luar permukaan air dan konsentrasi pada *bulk reactor* yang mula-mula harganya masih kecil.

2.7. PEMETAAN PENELITIAN MODEL TRANSFER OKSIGEN FISIK DI RBC

Transfer oksigen fisik di RBC, di beberapa penelitian sebelumnya menginterpretasikannya berbeda – beda. Pada **Tabel 2.2** dipetakan model transfer oksigen fisik di RBC yang sudah dilakukan peneliti sebelumnya.

Tabel 2.2. Penelitian Tentang Penentuan Nilai Transfer Oksigen ($K_L a$) di RBC

Sumber	Spesifikasi Alat	Model & Asumsi	Rumusan dan Hasil
1. Pendekatan pertama melalui <i>liquid film</i> di disk saat terpapar di udara (K_{La_d})			
Yamane & Yoshida (1972)	Jumlah stage : <i>Single stage</i> Disk & bahan : <i>Flat disk, PVC</i> ϕ Disk (mm) : 80 mm Tebal disk (mm) : -- Jumlah disk/stage : -- ω (rpm) : -- Kedalaman disk (%) : 40 t_R (detik) : 0.2-1.5	<ul style="list-style-type: none"> - Menggunakan persamaan Higbie (1935)(Gupta,2007) - terjadi pencampuran yang sempurna <i>liquid film</i> menuju cairan di reaktor dalam sekali putaran perlintasan. - ketebalan δ di disk <i>uniform</i>. - ω <i>liquid film</i>=ω disk 	$K_L = 2 \sqrt{\frac{D}{\pi \cdot t_R}} \text{ jika } \frac{\delta}{\sqrt{D \cdot t_R}} \geq 1.7$ <p>Dengan, $\frac{\delta}{\sqrt{D \cdot t_R}}$ adalah pengukuran ketebalan film dibagi kedalaman penetrasi oksigen karena difusi.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Asumsi tersebut sesuai untuk ω tinggi, $I \approx R$ disk. - Untuk kecepatan putaran yg rendah, persamaan Higbie tidak sesuai, karena <i>liquid film</i> di disk sudah jenuh oksigen karena waktu kontak yang panjang
Bintanja <i>et al.</i> (1975)	Jumlah stage : <i>Single stage</i> Disk & bahan : <i>Flat disk</i> ϕ Disk (mm) : 600 Tebal disk (mm) : 20 Jumlah disk/stage : 10 ω (rpm) : 7,4 ; 17.5 ; 24.4 Kedalaman disk (%) : 24	<ul style="list-style-type: none"> - Pertama kali memperkenalkan nilai K_L, untuk ω rendah - Ketebalan <i>liquid film</i> () <i>uniform</i> - Kecepatan film sama dengan kecepatan disk. - Oksigen tercampur sempurna 	$K_L = 2 \left(\frac{D_L}{\pi t_R} \right)^{0.5} \text{ jika } \frac{\delta}{(D_L t_R)^{0.5}} \geq 1.7$ $K_L = \frac{2 \alpha}{\pi^{0.5}} \frac{\alpha}{t_R} \approx \frac{\alpha}{t_R} \text{ jika } \frac{\delta}{(D_L t_R)^{0.5}} \leq 0.8$ <ul style="list-style-type: none"> - Didapatkan secara eksperimental, nilai K_L 49%-87% yg diukur di bulk liquid, dari nilai K_L secara teori - Pengukuran $K_{L\text{eksperimen}}$ di permukaan δ, didapat nilai yg tidak akurat pada ω rendah
Zeevalkink <i>et al.</i> , (1979)	Jumlah stage : <i>Single disk</i> Disk & bahan : <i>Flat disk</i> ϕ Disk (mm) : 600 Tebal disk (mm) : 20 Jumlah disk/stage : 10 ω (rpm) : 10,14,18,22,26,30 Kedalaman disk (%) : 24	<ul style="list-style-type: none"> - Rumusan K_L untuk kecepatan putaran pada range medium, sehingga asumsinya oksigen tidak tercampur sempurna - Yang pertama kali memperkenalkan nilai K_L tergantung $\delta/\sqrt{D \cdot t_R}$ dan faktor imersi, I 	$K_h = 0.2 (2 + t_d^2) R_h^{0.4}$ $R_h = (R-H)/R$ $t_d = \text{Dimensionless film thickness} = \delta \sqrt{D \cdot t_R}$ $K_h = \text{Dimensionless } K_L a = K_h = K_L a / (2 \sqrt{\frac{D}{\pi \cdot t_R}})$

Sumber	Spesifikasi Alat		Model & Asumsi	Rumusan dan Hasil
Kim and Molof (1982)	Jumlah stage	: <i>Single stage</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Transfer oksigen melalui <i>liquid film</i> di disk, dengan pendekatan <i>Volume Renewal Number</i> (Nv) - δ menggunakan rumusan, Zeevalkink, 1978 	$Nv = (\omega^{1.5} D^{0.5} S^{-1})$ $(K_L a) = 0.0011 (Nv)^{0.722}$
	Disk & bahan	: <i>Flat disk</i>		Dengan $r = 0.991$, dan persamaan ini valid untuk, $e/R \approx 0.042$ dan $H/R \approx 0.15$
	ϕ Disk (mm)	: 152,4;304,8;609,6		
	Tebal disk (mm)	: 20		
	Jumlah disk/stage	: 3; 4; 3		
	ω (rpm)	: 21 ; 41 ; 61		
	Kedalaman disk (%)	: 85		
Kubsad <i>et al.</i> (2004)	Jumlah stage	: <i>Three stage</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Nilai $KL a_d$ modifikasi dari penelitian Kim and Molof, 1982. - Segmen linear model dibandingkan dengan data eksperimen - δ menggunakan rumusan Zeevalkink, 1978 	$e/R = 0.042$ dan $H/t_R = 0.15$ $K_L a = a(KNv)^b$ Koefisien a dan b berasal dari log-log plot $K_L a$ dan KNv , dan hubungan matematis antara $K_L a$ dan KNv . $K_L a = 0.001 (KNv)^{0.732}$. Hubungan antara $K_L a$ dan KNv linier, jika oksigen transfer diasumsikan terjadi hanya melalui <i>liquid film</i> di disk. $(Nv) = (A. \omega.) / V$ $Nv = 1.697 A.n \omega^{1.5} \phi^{0.5} / V. \quad R^2 = 0.9636$
	Disk & bahan	: <i>Flat disk</i>		
	ϕ Disk (mm)	: 230		
	Tebal disk (mm)	: 0,6		
	Jumlah disk/stage	: 14		
	ω (rpm)	: 5,3		
	Kedalaman disk (%)	: 35		
2. Pendekatan yang kedua, melalui gerakan liquid di bulk reactor ($K_L a$)				
Ouano (1978)	Jumlah stage	: <i>Single disk</i>	Menghubungkan Koefisien transfer masa pada phase liquid (K_L) dengan Reynolds Number, dengan menggunakan model Analisa Dimensi yang dibandingkan dengan eksperimen	$K_L \frac{V_E / A_c}{D_L} = K \left(\frac{A_t}{A_p} \right)^a \left(\frac{\phi^2 \omega \rho}{\mu} \right)^b$ $NR_e = \frac{\phi^2 \omega \rho}{\mu}$
	Disk & bahan	: <i>Flat disk</i>		
	ϕ Disk (mm)	: -		
	Tebal disk (mm)	: -		Hasil eksperimen, Nilai $b = 0.59$
	Jumlah disk/stage	: -		
	ω (rpm)	: -		
	Kedalaman disk (%)	: -		Beberapa detail penelitian tidak dijelaskan

Sumber	Spesifikasi Alat	Model & Asumsi	Rumusan dan Hasil
Boumansour & Vasel (1998)	Jumlah stage : <i>Single disk</i> Disk & bahan : <i>Flat disk-PVC</i> ϕ Disk (mm) : 250 Tebal disk (mm) : 30 Jumlah disk/stage : 9 ω (rpm) : 6;12;17;24;30; 35 Kedalaman disk (%) : 39,86	- <i>Tracer gas</i> menggunakan propane untuk mengukur transfer oksigen - Mengoreksi nilai k.l.m,n rumusan Sant' Anna,1980	$Sh = K N_{Re}^1 N_{Fr}^{0.769} I^{0.135}$ $Sh = 2.673 N_{Re}^{0.769} N_{Fr}^{0.135} I^{0.865}$ $R^2 = 0.97$
3. Pendekatan yang ketiga, menggabungkan nilai $K_L a_t$ dan $K_L a_d$			
Rittmann <i>et al.</i> (1983)	Jumlah stage : <i>Single disk</i> Disk & bahan : <i>Flat disk</i> ϕ Disk (mm) : 50 Tebal disk (mm) : 10 Jumlah disk/stage : 9 ω (rpm) : 2-30 Kedalaman disk (%) : 37	- Pengaruh temperatur pada transfer oksigen - Fenomena bahwa nilai $K_L a$ adalah akumulasi dari $K_L a_d$ dan $K_L a_t$ - δ menggunakan rumusan Zeevalkink,1978	$K_L a = K_L a_{20} \theta^{(T-20)}$ $\theta > 1.0 (<2rpm) ; \theta < 0.993 (2-7 rpm); \theta \approx 1.016 (>7rpm)$ $K_L a = K_L a_t + K_L a_d = \dots + s. \omega. a_d$ <p>Dalam eksperimennya didapatkan bahwa nilai $K_L a_d$ pengaruhnya kecil pada ω rendah, dibandingkan $K_L a_t$</p>
Mukherji <i>et al.</i> , (2008).	Jumlah stage : <i>Three stage</i> Disk & bahan : <i>Flat disk</i> ϕ Disk (mm) : 230; 140; 78 Tebal disk (mm) : 0,6 Jumlah disk/stage : 14; 9; 10 ω (rpm) : 10 Kedalaman disk (%) : 35	- Perbedaan geometri RBC pengaruhnya terhadap nilai $K_L a_t$ dan memasukkan nilai ketebalan sebagai parameter yang berpengaruh pada nilai $K_L a_t$ - δ menggunakan rumusan Zeevalkink,1978	$\left(\frac{K_L a_t \cdot \rho \cdot A_d}{\mu} \right) = \left(\frac{D}{A_d^{1/2}} \right)^{\psi} \left(\frac{\rho \cdot A_d \cdot \omega}{\mu} \right)^{\epsilon} \left(\frac{A_d}{A_t} \right)^{\theta} \left(\frac{\delta}{V^{1/3}} \right)^{\lambda}$ <p>ψ, ε, θ, λ : adalah parameter penyesuaian, dengan menggunakan uji statistik, SYSTAT 10.2, persamaan regresi non linier, didapatkan nilai ψ = -0.327, ε = 1.018, θ = 0.624, λ = 0.743</p>

Tabel 2.3. Penelitian Yang Sudah Dilakukan Tentang Ketebalan *Liquid Film* (δ) di *Rotating Vertically Disk*

Sumber	Spesifikasi Alat		Model & Asumsi	Rumusan dan hasil
Landau & Levich (1942)	Disk & bahan ω (rpm) Metode	: <i>Flat disk</i> : <i>intermediate-high velocity</i> : numerik	Memprediksi ketebalan <i>liquid film</i> saat terseret disk keluar dari permukaan air.	Ketebalan liquid film pada high velocity $h \approx A \left(\frac{\eta v_0}{\rho \cdot g} \right)$ Ketebalan liquid film pada <i>intermediate velocity</i> $h \approx \left(\frac{\eta v_0}{\rho \cdot g} \right)^{1/2} f \left(\frac{\eta v_0}{\sigma} \right)$ <p>Dengan : adalah fungsi parameter tidak berdimensi yang didapat dari eksperimen</p>
Zeevalkink <i>et al.</i> , (1978)	Disk & bahan ϕ Disk (mm) Jarak disk-(cm) Tebal disk (mm) ω (rpm) Kedalaman disk(%) Metode	: <i>Flat disk, PVC</i> : 600 : 2 cm : 2.0 : 0-60 : Memvariasi kedalaman air : Ekperimental dan numerik	1. Diasumsikan $\delta < \delta_{sz}$. Yang mengaju pada rumusan Schlichting (1960) 2. Gaya <i>Capillary</i> diabaikan, dan gaya <i>inersial</i> mendominasi, pada kecepatan putaran rendah. 3. Ketebalan liquid film di disk, dianggap seragam 4. Ketebalan <i>liquid film</i> adalah fungsi profil kecepatan aliran di disk dan imersi	$\bar{\delta} = \frac{\Phi_w}{\frac{1}{2} \omega (R^2 - H^2)} = \frac{4}{15} \left(\frac{2\nu\omega^3}{g} \right)^{1/2} (R^2 - H^2)^{1/4}$ $\delta_{sz} \approx 5 \left(\frac{\nu 2\theta r}{\omega r} \right)^{1/2} \text{ dengan } \theta = \arccos(H/r)$ $Re = \bar{S}Ru/\nu \text{ dan } Ca = \eta\omega R/\sigma$
Suga & Boongorsrang (1984)	Disk & bahan ϕ Disk (mm) Tebal disk (mm) ω (rpm) Kedalaman disk (%) Metode	: <i>Flat disk, PVC</i> : 150 : 1.0 : 0-60 : 50 : Ekperimental dan numerik	Formasi <i>boundary layer</i> yang terbentuk dari percampuran yang tidak sempurna dari <i>liquid film</i> menuju <i>bulk liquid</i> sampai di <i>fase submerge</i>	$\delta_{sz} = 5 \left[\frac{\nu \cdot r \cdot (2\theta)}{\omega \cdot r} \right]^{1/2} S_c^{-1/2}$ $S_c = \nu D \text{ (Schmid number)}$ <p>Modifikasi dari persamaan Zeevalkink (1978), <i>liquid film</i> sebagai fungsi dari posisi radial di disk saat terpar di udara</p>

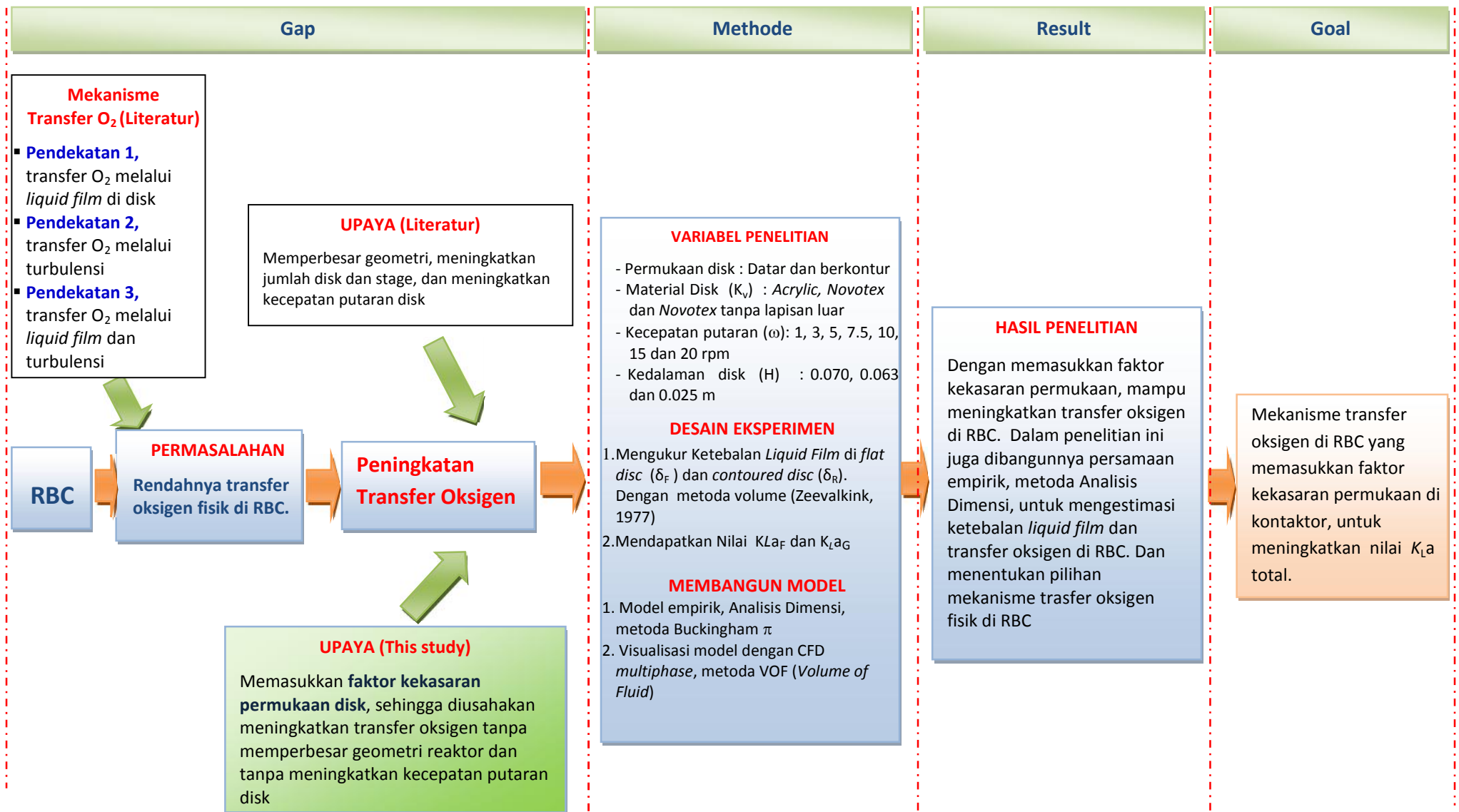
Sumber	Spesifikasi Alat		Model & Asumsi	Rumusan dan hasil
Sanjay (2007)	Disk & bahan	: <i>Flat disk</i>	Ketebalan <i>liquid film</i> diukur dengan menggunakan <i>laser distance sensor</i> dibuat oleh LEUZE GmbH company	Didapat dari hasil eksperimen, ketebalan <i>liquid film</i> , berdasarkan berdasarkan kecepatan putaran. Data yang digunakan <i>predicted liquid film thickness</i> , karena keterbatasan <i>Laser Sensor</i> yang digunakannya : $\omega = 20 \text{ rpm}$, $\delta \approx 22 - 62 \mu\text{m}$ (di 2 -12.5 cm dari pusat disk) $\omega = 30 \text{ rpm}$, $\delta \approx 28 - 76 \mu\text{m}$ (di 2 -12.5 cm dari pusat disk) $\omega = 40 \text{ rpm}$, $\delta \approx 30 - 89 \mu\text{m}$ (di 2 -12.5 cm dari pusat disk)
	ϕ Disk (mm)	: 250		
	Tebal disk (mm)	: 20		
	ω (rpm)	: 20,30,40		
	Kedalaman disk (%)	: 42		
	Metode	: eksperimen		
	Tipe putaran disk	: <i>vertical</i>		
Afanasiev <i>et al.</i> , (2008)	Disk & bahan	: <i>Flat disk</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Model tiga dimensi untuk <i>rotating disk</i> dan pengaruh gaya drag - Diasumsikan <i>laminar axis symmetrical flow</i> - Aliran diasumsikan <i>steady state</i>, profil aliran pada saat mengalir di puncak disk partially constant, dan saat menuju muka air partially parabolic. - Kecepatan aliran $U = R$ - Profil <i>film</i> adalah fungsi dari kedalaman imersi disk dan kecepatan putaran. 	Parameter perhitungan untuk <i>high viscous liquid</i> : $\mu = 1 \text{ Pa s}$; $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$; $\gamma = 72.7 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$; R_{in} (jari-jari shaft) = $2.723 \cdot 10^{-2} \text{ m}$; $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ <i>Non dimensional liquid film</i> : $h_{\infty} = 0.94581 (r_{in})^{2/3}$ Didapatkan bahwa nilai <i>Cappillary number</i> sangat kecil Didapatkan bahwa profil ketebalan meningkat, karena R dan ω meningkat Dan profil <i>liquid film</i> adalah fungsi dari kedalaman imersi dan kecepatan putaran
	ϕ Disk (mm)	: 200		
	Tebal disk (mm)	: --		
	ω (rpm)	: 0.277, 1 dan 2 rpm		
	Kedalaman disk (%)	: 10-40		
	Metode	: <i>Finite Element Methode</i>		
	Tipe putaran disk	: <i>vertical</i>		
Miah <i>et al.</i> , 2016	Jenis liquid	: <i>high viscous liquid</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Model tiga dimensi untuk <i>rotating disk</i> dan pengaruh gaya drag - Aliran <i>transient</i>, profil aliran pada saat mengalir di puncak disk partially constant, dan saat menuju muka air partially parabolic. - Kecepatan aliran $U = R$ - Profil <i>film</i> adalah fungsi dari kedalaman imersi disk dan kecepatan putaran. 	Gaya yang berpengaruh : <ul style="list-style-type: none"> - Gaya viscous saat <i>drag out</i> - Gaya gravitasi saat <i>drag in</i> Prediksi ketebalan <i>liquid film</i> di CFD, dengan menggunakan model empirik Analisis Dimensi : $h' = (2.61 \cdot Ca^{0.1} Fr^{0.32}) / (Re^{0.2} (r/R)^{0.36} \theta^{0.16})$
	Disk & bahan	: <i>Flat disk</i>		
	ϕ Disk (mm)	: 200		
	Tebal disk (mm)	: --		
	ω (rpm)	: 1 dan 3 rpm		
	Kedalaman disk (%)	: 50		
	Metode	: <i>VOF</i>		
	Tipe putaran disk	: <i>vertical</i>		
	Jenis liquid	: <i>high viscous liquid</i>		

2.7. Kebaruan Penelitian (State of The Art)

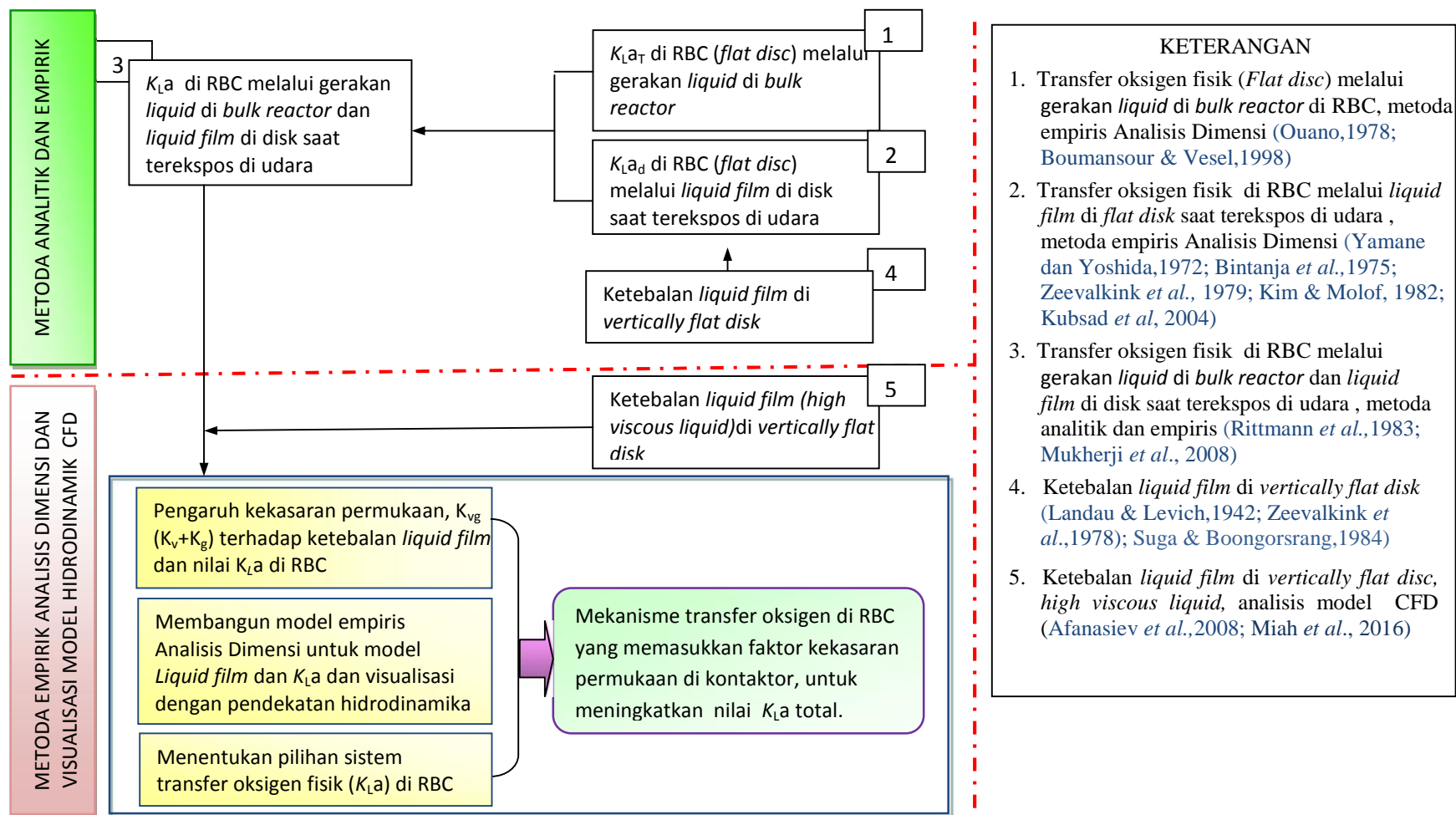
Permasalahan rendahnya transfer oksigen di RBC, selama ini sudah diteliti dengan beberapa metoda untuk meningkatkan transfer oksigen. Misalnya dengan menambah jumlah disk untuk memperbesar luas permukaan kontak dengan udara, dan meningkatkan turbulensi. Tetapi, dengan memperbanyak jumlah disk, akan memperberat kinerja motor yang berfungsi sebagai pemutar disk. Untuk itu dalam penelitian ini, diperhitungkan faktor kekasaran permukaan, dengan memvariasi material disk dan membentuk kontur di atas permukaan disk. Hal ini bertujuan untuk memperbesar luas permukaan kontak dan meningkatkan turbulensi.

Kebaruan (*novelty*) dalam penelitian ini adalah, memasukkan faktor kekasaran permukaan terhadap nilai transfer oksigen fisik (K_La) di RBC. Dalam hal ini kekasaran permukaan (K_{vg}) yang diperhitungkan terdiri dari dua macam, yaitu K_v (kekasaran permukaan dengan ukuran mikroskopik) dan K_g (kekasaran permukaan dengan ukuran makroskopik). Sehingga dapat meningkatkan transfer oksigen tanpa memperbesar geometri reaktor, dan tanpa meningkatkan kecepatan putaran disk. Dipilih faktor kekasaran permukaan, karena memiliki beberapa kelebihan, yaitu meningkatkan luas permukaan disk, turbulensi dan efisiensi ukuran geometri reaktor. Hingga saat ini penelitian yang mengkaji tentang transfer oksigen fisik di RBC, yang menggunakan disk dengan bentuk permukaan tidak licin hidraulik belum ada. Masing – masing peneliti, selalu menggunakan material yang berbeda dalam penelitiannya, sehingga menghasilkan rumus yang berbeda. Dijelaskan dalam **Gambar 2.16** (*Story Line Disertation*)

Hal ini menempatkan penelitian ini pada posisi sebagai pengembangan dari penelitian-penelitian sebelumnya. Orisinalitas dan posisi penelitian dijelaskan dalam **Gambar 2.17**.



Gambar 2.16. Story Line Disertation



Gambar 2.17. Kedudukan Penelitian Pada Peta Penelitian Transfer Oksigen Fisik di RBC dan Kebaruan Penelitian

BAB 3

METODE PENELITIAN

Jenis penelitian ini *experiment study* skala *pilot plant* dengan *batch process*. Penelitian ini mengkaji tentang pengaruh kekasaran permukaan dan komponen kecepatan putaran disk, terhadap nilai transfer oksigen fisik di RBC. Dalam penelitian ini, terdiri dari tiga tahapan penelitian, yaitu :

1. Tahap I, secara eksperimental, menentukan profil ketebalan *liquid film* (δ) yang tergeret disk pada saat berputar keluar dari permukaan air.
2. Tahap II, secara eksperimental, menentukan nilai koefisien transfer oksigen (K_La) di reaktor RBC
3. Tahap III, membuat model empirik dalam Analisis Dimensi, menggunakan metoda *Buckingham's f Theorema* dan memvisualisasi dengan model hidrodinamik, dengan *software Computational Fluid Dynamic (CFD)*

3.1. Rancangan Penelitian Tahap 1, Menentukan Ketebalan *Liquid Film*

Tujuannya untuk menentukan ketebalan *liquid film* yang terseret disk saat berputar ke atas keluar dari badan air reaktor, secara eksperimental.

3.1.1. Variabel Penelitian

Model fisik ini diatur pada skala laboratorium, dengan memvariasi :

- Kekasaran Permukaan Disk (K_{vg}) : datar (K_v) dan berkontur (K_g)

Material Disk (K_v) : *Acrylic, novotex (Nov-O)* dan *novotex* tanpa lapisan luar (*Nov-I*)

Kontur disk, (K_g) : bentuk kontur kotak, posisi kontur radial dengan lebar jurang dan gunung sama (K_{g1}); kontur radial dengan lebar jurang lebih lebar dari lebar gunung (K_{g2}); kontur seperti tipe 1, ditambahkan variasi melintang di kontur radial (K_{g3}) (**Gambar 3.2**)

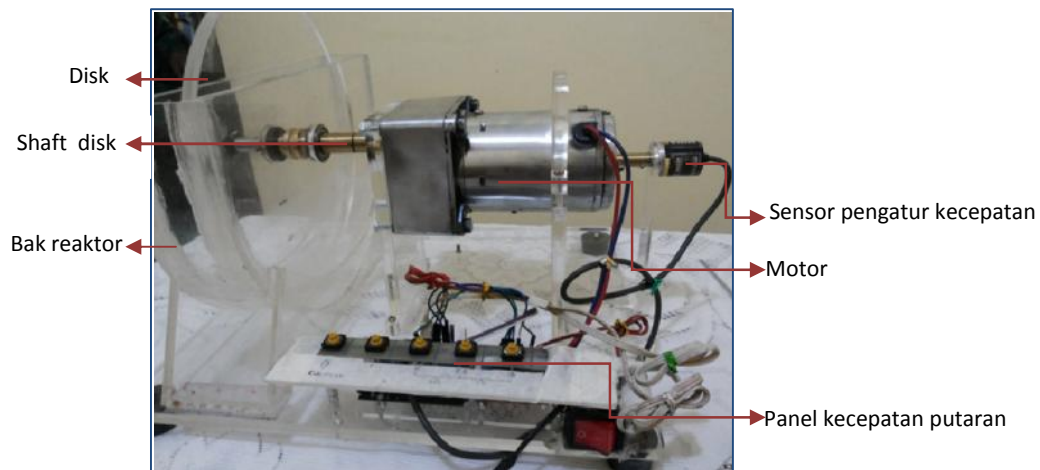
- Kecepatan putaran (ω) : 1, 3, 5, 7.5, 10, 15 dan 20 rpm (N_{re} : 6313.7; 18941.2; 31568.7; 47353.1; 63137.5; 94706.2; 126274.9)

- Kedalaman disk (H) : 0.070, 0.063 dan 0.025 m

(Kedalaman disk yang dimaksud, jarak dari poros disk ke muka air di reaktor)

3.1.2. Bahan dan Alat

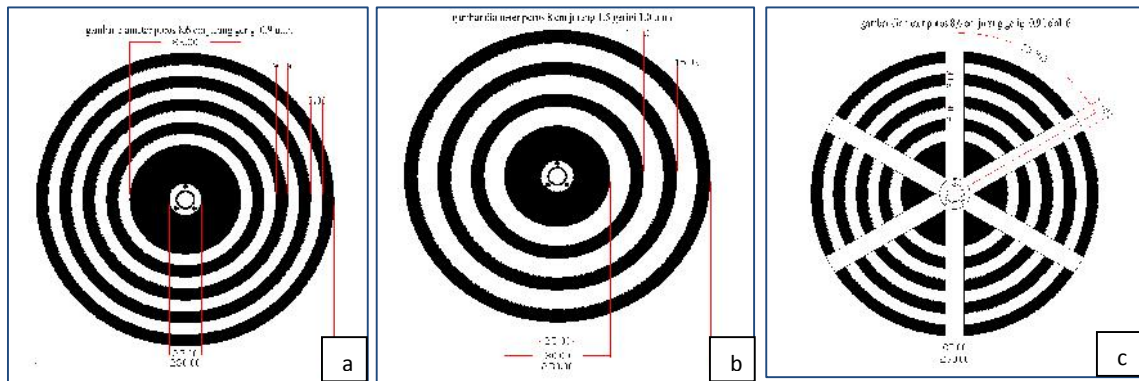
1. Bahan utama yang digunakan adalah: aquades pada ($T = 26^{\circ}\text{C}$; $\rho = 996,81 \text{ kg/m}^3$; $\mu = 0.8746 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m.s}$; $\nu = 0.8774 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, $\sigma = 0.07184 \text{ N/m}^2$).
2. Peralatan utama yang digunakan dalam penelitian ini, meliputi :
 - Reaktor yang didesain untuk satu disk, dibuat untuk memudahkan mengatur kecepatan putaran, kedalaman dan penggantian material disk. Skema reaktor dijelaskan dalam **Gambar 3.1.**, spesifikasi reaktor pada **Tabel 3.1.**
 - Disk dengan variasi kekasaran permukaan (K_{vg}), dengan luas masing-masing bentuk dan variasi kedalamannya (**Tabel 3.2.** Luas Setiap Variasi Disk).
 - Spon, untuk menyerap *liquid film* di disk



Gambar 3.1. Model fisik RBC, Dengan *Single Disc* (Dibuat Tahun 2015)

Tabel 3.1 Spesifikasi Reaktor Dengan Satu Disk, Penelitian Tahap 1.

No.	Keterangan	A_f	A_{g1}	A_{g2}	A_{g3}
1.	Jumlah disk	1	1		
2.	Bahan Disk	- <i>Acrylic</i> - <i>Novotex (Nov-O)</i> - <i>Novotex tanpa lapisan luar (Nov-I)</i>	- <i>Novotex (Nov-O)</i> - <i>Novotex tanpa lapisan luar (Nov-I)</i>		
3.	Diameter disk (cm)	23	23		
4.	Tebal disk (cm)	1.0	1.0		
5.	Jarak sisi luar disk dengan dinding dalam bak(cm)	1.5	1.5		
6.	Lebar gunung-lembah, pada disk (cm)	-	0.9-0.9	1.0-1.5	0.9-0.9
7.	Tinggi gunung-lembah disk (cm)	-	0.3-0.3	0.3-0.3	0.3-0.3
8.	Jumlah belah	-	-	-	6
9.	Lebar belah	-	-	-	1.0



Gambar 3.2. Skema Disk Berkontur Yang Digunakan Dalam Penelitian ini,
(a) Tipe 1; (b) Tipe 2; (c) Tipe 3 (Skema dibuat Tahun 2015)

Sedangkan luas setiap tipe kontur dijelaskan pada **Tabel 3.2.** Variasi bentuk permukaan, yang meliputi bentuk permukaan datar (K_v), berkontur tipe 1 (K_{g1}), berkontur tipe 2 (K_{g2}) dan berkontur tipe 3 (K_{g3}).

Tabel 3.2. Luas Disk Bentuk Permukaan Berdasarkan Variasi Kedalaman

No.	Kedalaman Disk (H) (m)	Luas Disk (cm ²)							
		A_f		A_{g1}		A_{g2}		A_{g3}	
		<i>Acrylic & Novotex</i>		<i>Novotex O & I</i>		<i>Novotex O & I</i>		<i>Novotex O & I</i>	
		A_{Total}	A_{Wetted}	A_{Total}	A_{Wetted}	A_{Total}	A_{Wetted}	A_{Total}	A_{Wetted}
1	0.0070	261.538	204.22	331.744	259.165	313.837	244.440	344.848	277.208
2	0.0063	390.786	220.33	373.938	282.922	355.089	270.794	392.256	287.346
3	0.0025	395.841	245.15	508.344	314.496	477.996	296.277	538.896	345.110

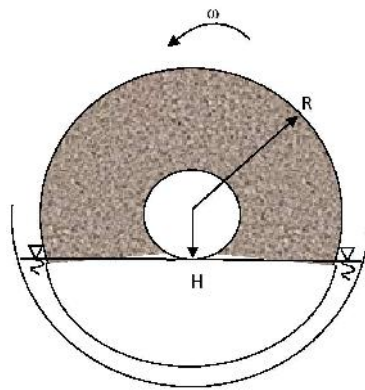
Uraian dari kajian eksperimental, terdiri dari 2 tahap pekerjaan, yaitu mengukur ketebalan *liquid film* pada disk permukaan datar terlebih dahulu, dilanjutkan tahap ke dua, pada disk permukaan berkontur.

3.1.3. Langkah Percobaan

1. Air bersih diisikan pada bak, sesuai dengan variasi rasio kedalaman disk. Kemudian disk dipasang pada alat dan diputar dengan variasi kecepatan yang sudah ditetapkan. Dengan mengatur temperatur air dijaga 26°C.
2. Setelah beberapa kali putaran (agar kondisi *steady state*) sejumlah air yang tergeret disk, diukur dengan spon yang ditempelkan pada disk.

Penempatan spon sepanjang permukaan yang tidak tercelup air, inilah yang disebut daerah ketebalan *film ultimate*, dijelaskan dalam **Gambar 3.3**. Kemudian berat disk dengan spon basah diukur

3. Dari berat yang bertambah (M) perputaran, ketebalan *liquid film* rata-rata dapat dihitung dengan mengasumsikan bahwa air mengalami penyebaran yang sama diseluruh permukaan disk.
4. Maka perhitungan menggunakan **Persamaan 2.20**.



Gambar 3.3. Area yang diarsir adalah area spon

3.1.4. Analisis Data

- Menentukan pengaruh kekasaran permukaan (K_{vg}), kecepatan putaran (ω), kedalaman disk (H) terhadap ketebalan *liquid film* (δ). Hal ini diberlakukan pada disk permukaan datar dan permukaan berkontur.
- Dilakukan uji statistik meliputi : uji distribusi dan normalitas data, metoda Anderson-Darling dan uji korelasi variabel independen terhadap *liquid film* (δ) menggunakan metoda desain faktorial.

3.2. Rancangan Penelitian Tahap 2. Menentukan Nilai Transfer Oksigen (K_La) di RBC

Tujuannya untuk menentukan nilai transfer oksigen (K_La) secara eksperimen. Nilai ini didapatkan dari pengukuran konsentrasi, DO awal (C_0), DO tiap waktu (C_t) dan DO saturasi (C_s). Dalam penelitian ini, menggunakan 2 reaktor, yaitu reaktor dengan satu disk dan reaktor dengan 14 disk. Tujuannya untuk mengetahui akumulasi nilai K_La dengan penambahan disk.

3.2.1. Variabel Penelitian

Model fisik ini diatur pada skala laboratorium, dengan memvariasi :

- Kekasaran Permukaan Disk (K_{vg}) : datar (K_v) dan berkontur (K_g)
- Material disk (K_v) : *acrylic*, *novotex O* dan *novotex I*
- Kecepatan putaran (ω) : 1;3;5;7.5;10,15 dan 20 rpm
- Kedalaman disk (H) : 0.0070, 0.0063, 0.0025 m

Dimana masing-masing variabel akan berinteraksi untuk melihat pengaruhnya terhadap transfer oksigen di RBC.

3.2.2. Bahan dan Peralatan

Bahan utama yang digunakan adalah:

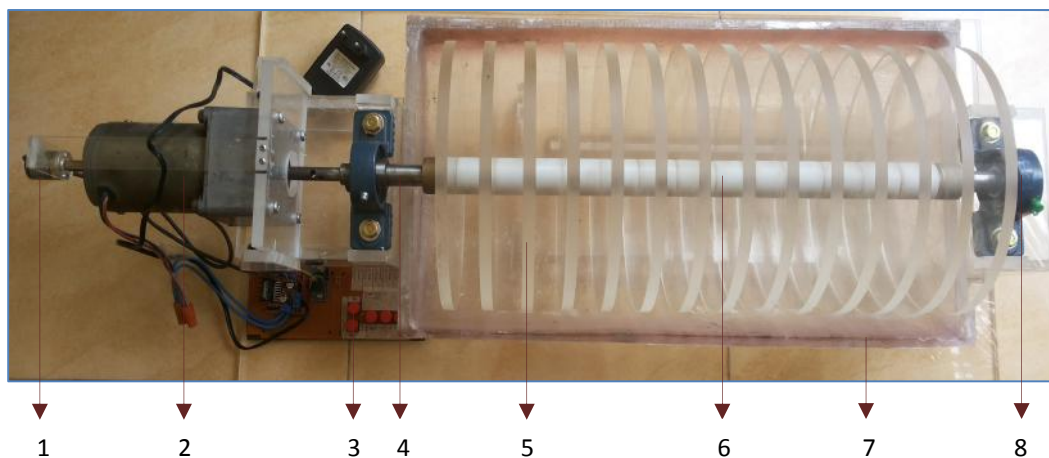
- aquadest (pada $T = 26^\circ\text{C}$; $\rho = 996,81 \text{ kg/m}^3$; $\mu = 0.8746 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m.s}$; $\sigma = 0.07184 \text{ N/m}$; $\nu = 0.8774 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$)
- sodium sulfit (8 mg/l per mg/l dari DO) (Anhydrous, 95% pure, Merck)
- cobalt chloride, sebagai katalis (0.05 mg/l)

Tabel 3.3. Spesifikasi Reaktor RBC, Penelitian Tahap 2

No.	Keterangan	R ₁			R ₂		
1.	Jumlah disk	1			14		
2.	Jumlah stage	1			1		
3.	Bentuk permukaan disk	Flat-Contour			Flat-Contour		
4	Luas Disk (m ²)						
	a. Flat disc	0.0415265			0.581371		
	b. Contoured disc type 1	0.1040688			1.4569632		
	c. Contoured disc type 2	0.0995992			1.3943888		
	d. Contoured disc type 3	0.1147609			1.6066526		
5.	Diameter disk (m)	0.23			0.23		
6.	Tebal disk (m)	0.01			0.01		
7.	Jarak antar disk (m)	0.015			0.015		
Geometri Reaktor Berdasarkan Kedalaman Disk							
Prosentase Kedalaman Disk (I)		19.6%	22.6%	39%	19.6%	22.6%	39%
8.	Jarak poros ke muka air (m)	0.07	0.063	0.025	0.07	0.063	0.025
9.	Panjang bak reaktor (m)	0.04	0.04	0.04	0.365	0.365	0.365
10.	Lebar bak reaktor (m)	0.22	0.24	0.265	0.22	0.24	0.265
11.	Interfacial Area (m ²)	0.0088	0.0096	0.0106	0.0803	0.0876	0.09673
12.	Volume bak, V (x 10 ⁻³ m ³)	0.36	0.44	0.825	3.292	4.035	7.665

Peralatan utama yang digunakan :

- Pada tahap 2 ini, dirancang reaktor RBC skala laboratorium yang didesain untuk 14 disk. Reaktor didesain agar mudah membongkar pasang disk, kedalaman disk, bak reaktor dan pengaturan kecepatan. (**Gambar 3.4**) Dengan spesifikasi reaktor, dijelaskan pada **Tabel 3.3**.
- DO meter (Lutron DO-5510, *Lutron Electronic Enterprise Co.Ltd*, Taipei, Taiwan), untuk mengukur nilai DO berdasarkan *time series*



Gambar 3.4. Model Fisik RBC Dengan 14 Disk (Dibuat Tahun 2016)

Keterangan gambar :

- | | |
|------------------------------|----------------------------------|
| 1. Sensor pengatur kecepatan | 5. Disk |
| 2. Motor | 6. Sekat antar disk |
| 3. Panel pengatur kecepatan | 7. Bak reaktor |
| 4. Shaft disk | 8. Pillow block, sebagai penahan |

Uraian dari kegiatan dari desain eksperimental, terdiri dari 2 tahap pekerjaan, yaitu mendapatkan nilai K_{La} pada reaktor R_1 dilanjutkan reaktor R_2 .

3.2.3. Langkah Percobaan

Untuk mengevaluasi K_{La} , diuji kondisi disk tidak berisi biomassa (*clean disk*). Transfer oksigen yang diuji mengikuti prosedur *non steady state clean water* di *Standard Methods* (APHA, 1988).

- Dijaga temperatur ruangan pada temperatur $27 \pm 2^\circ\text{C}$, aquadest yang dipilih dengan TDS rendah (maksimum 80 mg/l) dan pH netral .
- dilanjutkan DO di aquadest dikurangi dengan menambahkan sodium sulfit (8 mg/l per mg/l dari DO) (*Anhydrous, 95% pure, Merck*) dan cobalt

chloride (0.05 mg/l) sebagai katalis. Deoksigenasi air sampai 0.2 mg/l (Eckenfelder, 2000).

- Setelah deoksigenasi, dilakukan proses pemutaran disk, dengan mengatur kecepatan putaran. Temperatur air dilaporkan dari awal sampai akhir eksperimen, dan dijaga pada temperatur $26 \pm 2^\circ\text{C}$. Diukur konsentrasi DO, per perubahan nilai DO, proses dilanjutkan sampai mencapai 95% titik jenuh. DO meter diletakkan pada titik tengah stage.
- Ditentukan nilai K_La didasarkan pada **Persamaan 2.2**, $\ln [(C_s - C_0)/(C_s - C_t)]$ versus waktu (t), K_La sebagai *slope*.
- Proses dilanjutkan, dengan merubah kedalaman sesuai variasi yang ditetapkan

3.2.4. Analisa Data

- Menentukan pengaruh kekasaran permukaan (K_v dan K_g), kecepatan putaran (ω), kedalaman disk (H) dan ketebalan *liquid film* (δ) terhadap nilai transfer oksigen fisik di RBC (K_La). Hal ini diberlakukan pada disk permukaan datar dan permukaan berkontur.
- Dilakukan uji statistik meliputi : uji distribusi dan normalitas data, metoda Anderson-Darling dan korelasi menggunakan metoda desain faktorial (Montgomery, 2004 ; Box *et al.*, 1978)

3.3. Rancangan Penelitian Tahap 3, Membangun Model Empirik Analisis Dimensi dan Memvisualisasi Dengan CFD

Pada tahap 3 ini, analisa yang digunakan menggunakan 2 pendekatan, yaitu model hidrodinamika aliran (CFD) dan Analisis dimensi. Dibawah ini akan dijelaskan kedua model tersebut.

3.3.1. Membangun Model Empirik Analisis Dimensi

Data-data hasil penelitian dan variabel yang digunakan dalam penelitian ini, dianalisa dan selanjutnya dibuat persamaan empirik dalam bentuk bilangan tak-berdimensi.

Model empirik Analisis Dimensi, penyelesaiannya menggunakan metoda *Buckingham's f Theorem*. Didalam penggunaan metoda *Buckingham's f*, yang perlu diperhatikan urutan langkah berikut ini (Triatmodjo, 2003):

- a. Ditulis hubungan suatu fungsi dengan semua variabel n yang berpengaruh
- b. Menentukan m variabel berulang dan ditulis bentuk dari masing-masing nilai π . Setiap bentuk π terdiri dari variabel berulang dan satu variabel lain.
- c. Dengan bantuan prinsip kesamaan dimensi, dicari nilai a, b, c, \dots , dimana variabel m dipangkatkan dengan nilai a, b, c, \dots dan seterusnya
- d. Dimasukkan nilai-nilai pangkat tersebut pada persamaan
- e. Sesudah persamaan π ditentukan, ditulis hubungan yang dicari

Tidak ada aturan yang jelas menentukan m variabel berulang, tetapi yang perlu diperhatikan :

- a. Variabel harus mempunyai dimensi, tidak boleh ada yang mempunyai dimensi sama
- b. Sedapat mungkin variabel berulang adalah variabel bebas.

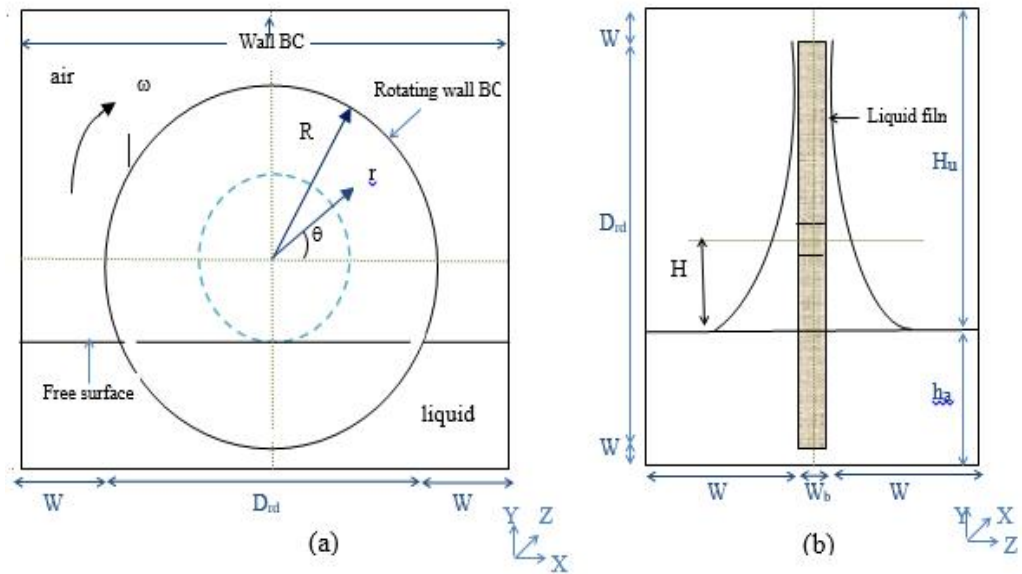
Biasanya variabel berulang yang dipilih adalah, sifat zat cair, karakteristik aliran dan karakteristik geometri.

3.3.2. Memvisualisasi Model Hidrodinamika Aliran, Berbasis CFD

Simulasi numerik dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak CFD. Yang dimaksudkan untuk mendapatkan detail aliran yang tidak didapat dari eksperimental. Dengan menggunakan *software* ANSYS 16.2 *Academic Package* dengan lisensi *software* milik Jurusan Teknik Kimia ITS. Untuk permodelan geometri digunakan *Design Modeler* dengan penentuan jumlah *grid* dan *node* menggunakan *meshing*. Perhitungan iterasi simulasi CFD menggunakan metoda *Volume of Fluid* (VOF).

1. Sistem Yang Dipelajari

Sistem yang digunakan dalam penelitian RBC adalah tangki berbentuk setengah lingkaran, yang didalamnya terdapat liquid dan rotating disk. Bentuk RBC ini dimodelkan seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3.5**.



Gambar 3.5. Konfigurasi RBC Yang Digunakan Dalam Penelitian Ini (a) Tampak depan (b) Tampak Samping (Dibuat Tahun 2015)

Rincian dimensi disk dan tangki dapat dilihat secara jelas pada **Tabel 3.4** di bawah ini.

Tabel 3.4. Rincian Dimensi *Vertically Rotating Disc*

No.	Parameter	Nilai
1.	W	15 mm
2.	W _b	10 mm
3.	H	7 cm
4.	H _u	18.5 cm
5.	Space udara	2 cm

2. Kondisi Batas

Boundary condition (kondisi batas) model yang meliputi :

- Shear stress di permukaan liquid film = 0.*
- Fluida yang menempel di dinding kecepatan alirannya = 0 (*no-slip*)
- Rotating disk* ditentukan sebagai *moving wall* dengan kecepatan putaran sesuai dengan variasi kecepatan putaran di penelitian

Tabel 3.5. Kondisi Operasional Yang Digunakan

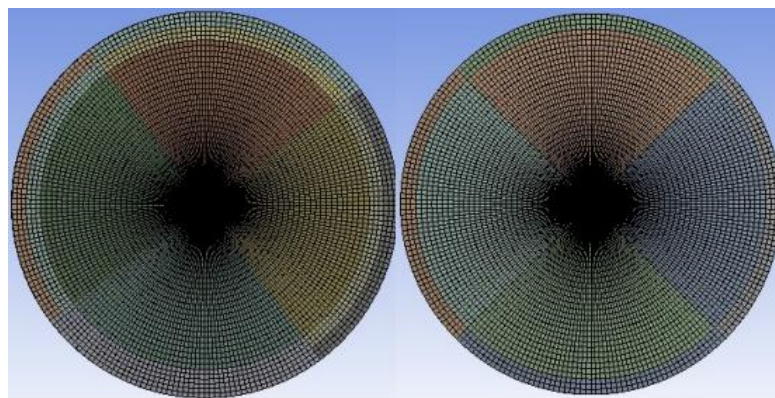
Parameter	Nilai
<i>Rotational speed</i>	10 rpm
<i>Fluid 1</i>	Udara
	<i>Property udara :</i> - Densitas (kg/m^3) : 1,2 - Viskositas (kg/m.s) : 1.8×10^{-5}
<i>Fluid 2</i>	air
	<i>Property air :</i> - Densitas (kg/m^3) : 998,2 - Viskositas (kg/m.s) : 0.001 - <i>contact angle</i> 10°
Bentuk permukaan disk	<i>Flat</i>

3.3.1.3. Prosedur Simulasi

Prosedur simulasi menggunakan 3 tahap yaitu *pre-processing*, *solver*, dan *post-processing*.

2.1.1. 1. Tahap Pre-processing

- Pemodelan bentuk geometri RBC, yang terbagi menjadi geometri *moving* (disk) dan geometri *stationary* (dinding)
- Membuat grid atau mesh sebagai domain perhitungan, untuk geometri *moving* dan geometri *stationary*, seperti tampak pada **Gambar 3.6.** Hasil Pembuatan *Grid* Dari Model



(a)

(b)

Gambar 3.6. Hasil Pembuatan *Grid* Dari Model, (a) *Moving*; (b) *Stationary* (Dibuat Tahun 2016)

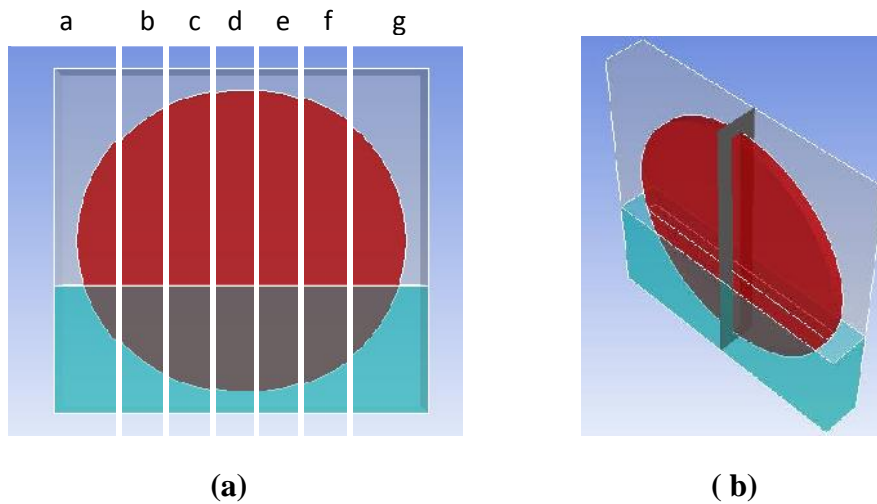
- c. Memindahkan *grid* atau *mesh* kedalam tahap *solver*, *moving zone* untuk *geometri moving* dan *stationary zone* untuk *geometri stationary*

2.1.2. 2. Tahap Solver

- a. Menentukan persamaan yang digunakan untuk memodelkan peristiwa pembentukan *liquid film*,
 - a.1. Persamaan Navier-Stokes 3D *unsteady*
 - a.2. Persamaan multi phase *Volume of Fluid* untuk memodelkan fase air dan fase udara
 - b. Menentukan kondisi operasi :
 - b.1. Sifat air dan udara seperti pada Tabel 3.5
 - b.2. Kecepatan *moving zone*
 - c. Menentukan diskretisasi untuk tiap-tiap variabel pada persamaan a.
 - c.1. Variabel kecepatan skema second order upwind
 - c.2. Tekanan dengan skema PRESTO
 - c.3. Volume fraksi tiap fase dengan skema *Geo-Reconstruction*
 - c.4. Variabel waktu dengan skema *first order implicit condition*
 - c.5. Gradien kecepatan dengan *Least Square Cell based*
 - c.6. Perpaduan variabel tekanan dan kecepatan, di gunakan skema PISO (*Pressure Implicit with Splitting of Operators*)
 - d. Menentukan kondisi batas
- 2.1.3. f. Melakukan iterasi dan perhitungan untuk tiap-tiap waktu sebesar 0.01 detik selama 200 detik.

2.1.4. 3. Tahap Post-processing

Tahapan *post-processing* meliputi analisa distribusi air dan analisa pola alir udara pada bidang pengamatan. Dimana pada tampak depan bidang pengamatan, gambar (a) dibagi menjadi 7 segmen gambar yang mewakili daerah aliran *liquid film* yang *drag out* dan *drag in*, sehingga kita bisa melihat secara detail aliran *liquid film*nya. Sedangkan gambar (b), menunjukkan posisi pengamatan, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3.7**. Bidang pengamatan untuk model *liquid film* di CFD



Gambar 3.7. Bidang Pengamatan Untuk Model *Liquid Film* di CFD, dengan (a) Tampak depan bidang pengamatan, yang dibagi menjadi 7 segmen mewakili daerah *drag out* (e-g) dan daerah *drag in* (a-d), (b) Tampak 3D Bidang Pengamatan (dibuat tahun 2016)

3.4. Kerangka Penelitian

Metode penelitian yang sudah diuraikan di atas, dapat diringkas dalam bagan di bawah ini.

Aktifitas Penelitian Yang Dilakukan

Tahap I. Mengukur Ketebalan *liquid film* (δ) di disk (Eksperimen)

<p>Variabel penelitian</p> <ul style="list-style-type: none"> - ω : 1,3,5,7.5,10,15, 20 rpm - I : 19.6 %, 22.6%, 39%,60% - K_v : <i>acrylic, novotex O dan novotex I</i> - K_g : <i>contoured disc type 1,2,3</i> 	<p>Tahapan Penelitian</p> <p>Pengukuran Ketebalan <i>Liquid Film</i> Di Disk Permukaan Datar (δ_F) dilanjut permukaan berkontur (δ_{G1} δ_{G2} δ_{G3})</p> <ul style="list-style-type: none"> -Eksperimental berdasarkan metoda volume (Zeevalkink,1978) - Data hasil pengukuran δ dihubungkan dengan variasi K_v, K_g, I dan ω <p>Analisa Data</p> <p>Menganalisa pengaruh kekasaran permukaan (K_v dan K_g), kecepatan putaran (ω), kedalaman disk (H) terhadap ketebalan <i>liquid film</i> (δ). Hal ini diberlakukan pada disk permukaan datar dan permukaan berkontur.</p>
--	---

Tahap 2. Mendapatkan Nilai Koefisien Transfer Oksigen ($K_L a$) (Eksperimen)

<p>Variabel penelitian</p> <ul style="list-style-type: none"> - ω : 1,3,5,7.5,10,15, 20 rpm - I : 19.6 %, 22.6%, 39%,60% - K_v : <i>acrylic, novotex O dan novotex I</i> - K_g : <i>contoured disc type 1,2,3</i> 	<p>Tahapan Penelitian</p> <p>Mendapatkan Nilai Transfer Oksigen, Di <i>flat disc</i> ($K_L a_F$) dan permukaan berkontur ($K_L a_{G1}$, $K_L a_{G2}$, $K_L a_{G3}$)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pengukuran DO di <i>bulk reactor</i> RBC - Data hasil dihubungkan dengan variasi K_v, K_g, I dan ω <p>Analisa Data</p> <p>Menganalisa pengaruh kekasaran permukaan (K_v dan K_g), kecepatan putaran (ω), kedalaman disk (H) terhadap nilai $K_L a$, untuk disk permukaan datar dan permukaan berkontur.</p>
--	---

Tahap 3. Membangun Model Empirik Analisis Dimensi dan Memvisualisasi Dengan Model Numerik (CFD)

1. Membangun model empirik Analisis Dimensi, dengan metoda *Buckingham's f Theorem*
 - a. Membangun model estimasi ketebalan *liquid film* (δ) di *flat* dan *contoured disc*, di RBC
Variabel input di *flat* dan *contoured disc*: D , \tilde{S} , H , R , K_{vg} , \dagger , \sim , ..., di/dt
 - b. Membangun model estimasi transfer oksigen fisik ($K_L a$) di *flat* dan *contoured disc* di RBC
Variabel input di *flat* dan *contoured disc*, skenario 1 : D , A_d , \tilde{S} , A_p , A_w , H , R , K_{vg} , \sim , ... (V , u untuk skenario 2)
Data input yang digunakan adalah data hasil eksperimen tahap 1 dan 2. Dihitung dengan metoda *Buckingham's f*, hasil perhitungan diuji dengan regresi linier berganda, kedekatan hasil model dengan data eksperimen, jika tidak sesuai dihitung awal lagi dengan analisis dimensi, hingga ada kesesuaian model dengan data eksperimen. Output yang dihasilkan, dilakukan verifikasi dan validasi data
2. Visualisasi dengan model hidrodinamika aliran, berbasis CFD
 - Model menggunakan persamaan umum : momentum (Navier-Stokes) dan kontinuitas
 - input : Menggambar dan membuat meshing. Memasukkan parameter input : Tabel 3.5, menentukan *boundary condition*, menentukan solver dan memasukkan under *relaxation factor*.
 - Running dan kalibrasi model.
 - Output : kontur fraksi volume *liquid* dan vektor aliran kecepatan udara
 - Validasi model dengan data eksperimen

Sistem transfer oksigen fisik ($K_L a$) total di RBC. Yang memperhitungkan faktor kekasaran permukaan (K_{vg})

Gambar 3.8. Tahapan Penelitian Yang Dilaksanakan

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Langkah awal dalam penelitian ini, adalah menentukan ketebalan *liquid film* di permukaan disk saat terekpote di udara. Ketebalan *liquid film* ini digunakan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap penelitian selanjutnya, yaitu transfer oksigen fisik di RBC. Kemudian penelitian dilanjutkan dengan memodelkan ketebalan *liquid film* dan transfer oksigen fisik di RBC.

4.1 KETEBALAN LIQUID FILM DI RBC

Ketebalan *liquid film* jika merujuk pada literatur yang menganggap bahwa jalan masuknya oksigen di RBC melalui *liquid film*, maka faktor *liquid film* ini menjadi penting untuk dianalisa. Penelitian awal, dipilih disk permukaan datar terlebih dahulu, karena informasi ketebalan *liquid film*nya sudah ada dari literatur. (Bintanja *et al.*, 1975; Zeevalkink *et al.*, 1978).

4.1.1. *Liquid Film* di Disk Permukaan Datar Berdasarkan Eksperimen

Untuk menentukan ketebalan *liquid film* di disk permukaan datar, diuji dengan menggunakan tiga bahan untuk media disk yang ada di pasaran. Ketiga bahan tersebut memiliki karakteristik permukaan yang berbeda-beda. Alasan pemilihan bahan plastik tersebut, berdasarkan analisis bahan disk yang berbeda dari literatur (Zeevalkink *et al.*, 1978; Boumansour *et al.*, 1998, dan Sanjay, 2007). Karena setiap literatur mengeluarkan hasil ketebalan *liquid film* dan nilai transfer oksigen yang berbeda, di suhu dan karakteristik air yang sama.

Dibawah ini, akan diulas pengaruh komponen kecepatan disk terhadap ketebalan *liquid film* di permukaan disk datar.

4.1.1.1. Pengaruh Komponen Kecepatan Disk Permukaan Datar Terhadap Ketebalan *Liquid Film*

Dalam penelitian ini, digunakan tiga media disk yang terbuat dari bahan dasar plastik, yang meliputi: *Acrylic*, *Novotex* dengan lapisan luar (*novotex O*) dan *Novotex* tanpa lapisan luar (*novotex I*).

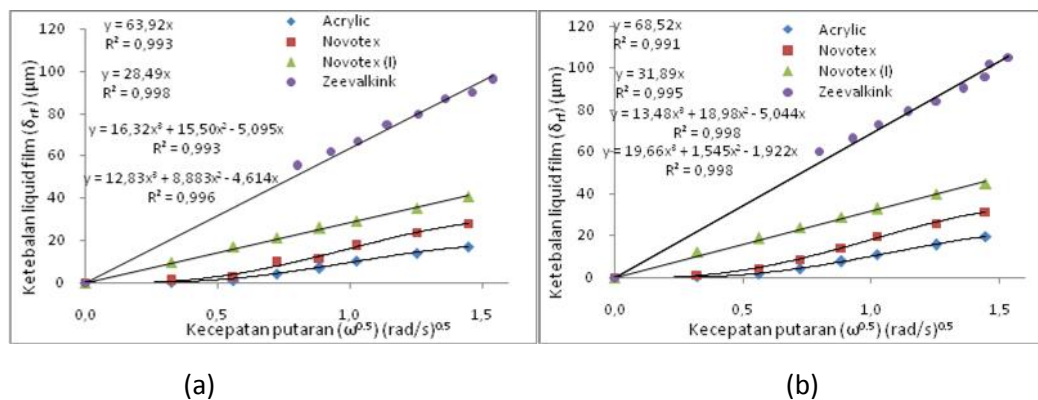
Luasan perhitungan disk yang digunakan untuk menentukan ketebalan *liquid film* secara eksperimen, menggunakan luasan total disk $\pi(R^2 - H^2)$ (Zeevalkink *et al.*, 1978).

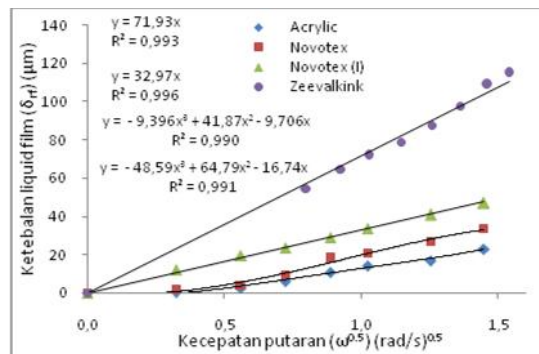
Data ketebalan *liquid film* (δ_{rf}) dengan replikasi sebanyak 15 kali terdapat pada **Lampiran 1**. Untuk selanjutnya dilakukan uji distribusi dan normalitas data sampel, dengan menggunakan metoda uji Anderson-Darling (AD) statistik (**Lampiran 3**). Hasil uji distribusi data, terdapat di **Lampiran 2**. Dibawah ini disajikan rata-rata ketebalan *liquid film* hasil uji statistik (δ_{rf}), disajikan dalam **Tabel 4.1**.

Tabel 4.1. Ketebalan Rata-Rata *Liquid Film* (δ_{rf}) di *Flat Disc*, Pada $T=26^\circ\text{C}$

w (rpm)	$\omega^{0.5}$ (rad/s) ^{0.5}	l = 19.6%, H = 0.07 m			l = 22.6%, H = 0.063 m			l = 39%, H = 0.025 m		
		δ_{rf} (μm)			δ_{rf} (μm)			δ_{rf} (μm)		
		Acrylic	Novotex O	Novotex I	Acrylic	Novotex O	Novotex I	Acrylic	Novotex O	Novotex I
1	0,324	0,107	0,767	9,589	0,321	1,035	12,075	0,254	2,029	12,418
3	0,560	1,151	2,685	16,877	1,726	4,142	18,630	3,043	4,311	19,768
5	0,724	4,219	8,206	21,097	4,140	8,625	23,805	6,339	9,635	23,823
7.5	0,886	6,904	11,507	25,700	7,594	13,800	28,979	11,157	18,006	29,145
10	1,023	10,357	17,261	29,152	11,045	19,320	32,775	14,200	21,299	33,706
15	1,253	13,809	23,782	35,289	15,533	25,543	39,675	16,989	27,131	41,057
20	1,447	16,877	28,015	40,660	19,675	31,065	44,85	23,074	33,724	47,139

Dari uji normalitas data, diperoleh hasil data berdistribusi normal. Data dari bahan *novotex I*, memiliki distribusi normal yang lebih tinggi (**Lampiran 4**). Data pada Tabel 4.1., diterapkan pada rumus dari literatur pada **Persamaan 2.15**, dimana dihubungkan δ_{rf} dengan $\omega^{0.5}$, di kedalaman disk yang berbeda dan pada tiap material disk, dijelaskan pada **Gambar 4.1**.





(c)

Gambar 4.1. Hubungan δ_{rf} Dengan $\omega^{0.5}$ di *flat disc*, Pada (a) $H=0.07$; (b) $H=0.063m$; (c) $H=0.025m$

Dari gambar di atas, ditinjau dari kecepatan putaran, profil ketebalan *liquid film* pada kecepatan putaran 1-5 rpm di material *acrylic* dan *novotex O* (sifat material hidrofobik), ketebalan *liquid film*nya tipis dan tidak stabil. Bahkan di kecepatan 1 rpm, hanya berbentuk titik-titik air yang menempel tidak beraturan di permukaan disk. Di kecepatan 3 rpm, *liquid film* mulai terikutkan meskipun pada posisi putaran tertentu menebal, menipis dan hilang, sulit untuk mengukur ketebalan *liquid film* tersebut. Berbeda dengan ketebalan *liquid film* di *novotex I* (bersifat hidrofilik), yang pada kecepatan rendah relatif tidak fluktuatif terhadap akar kecepatan putaran. Sehingga pada profil δ_{rf} terhadap $\omega^{0.5}$ adalah linier.

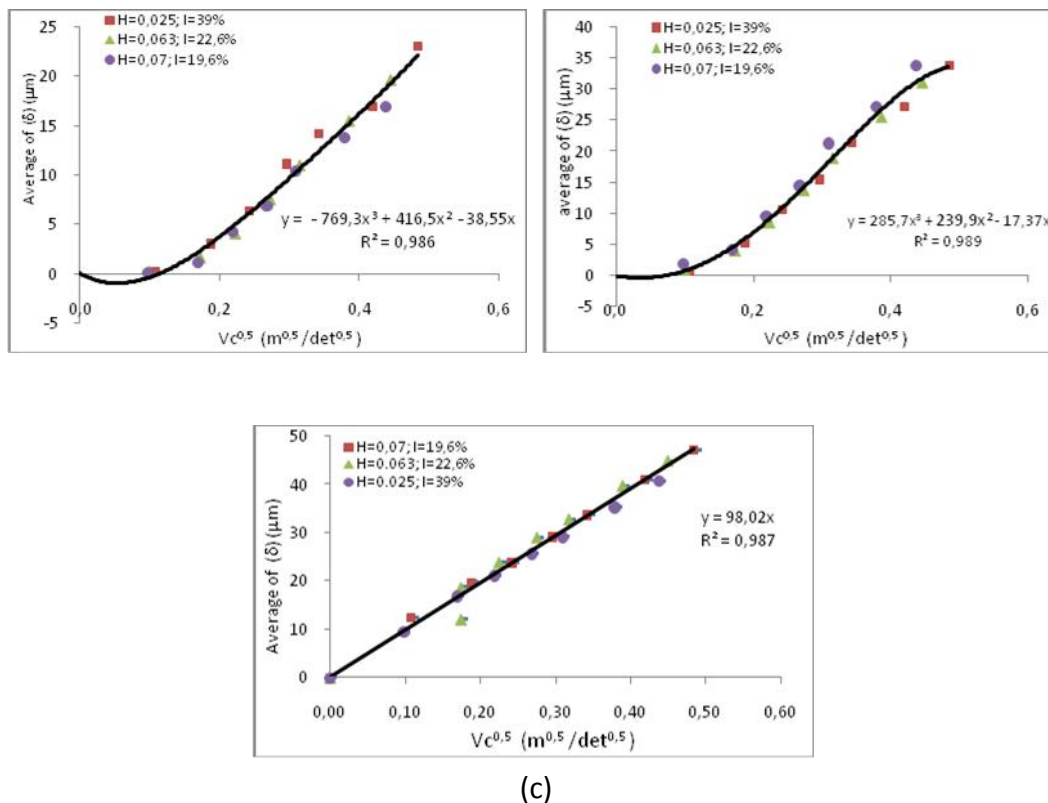
Ditinjau dari variasi kedalaman air dari hasil penelitian didapatkan bahwa ketebalan *liquid film* rata-rata di kedalaman 39%, dibandingkan dengan kedalaman lainnya, secara dominan yang lebih tinggi. Hal ini juga berlaku pada variasi jenis material, hasil eksperimen didapatkan hasil pada kedalaman 39% ketebalan *liquid film* rata-rata tertinggi.

Perbedaan ketebalan *liquid film* dari hasil penelitian ini dibandingkan dengan penelitian Zeevalkink *et al.*, 1978 dan Bintanja *et al.*, 1970, adalah :

- Kondisi temperatur yang berbeda, berpengaruh pada *viscositas kinematis* (ν), *densitas* (ρ), Zeevalkink *et al.*, 1978, menggunakan $T = 20^\circ\text{C}$, $\rho = 0.99823 \text{ gr/cm}^3$, $\nu = 1.00 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, Sedangkan penelitian ini pada $T = 26^\circ\text{C}$, $\rho = 0.99681 \text{ gr/cm}^3$; $\nu = 0.8774 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. Ketebalan *liquid film* lebih tinggi pada temperatur yang rendah dan viscositas yang tinggi.

b. Diameter disk (R), yang digunakan oleh Zeevalkink *et al.*, 1978 dan Bintanja *et al.*, 1970 sebesar 60 cm. Jari-jari disk yang lebih besar, akan menunjukkan meningkatnya kecepatan *peripheral* dan gaya centrifugal.

Kecepatan *peripheral*, adalah kecepatan di pinggir disk, dimana menurut Zeevalkink *et al.*, 1978, kecepatan aliran liquid film tertinggi di pinggir disk. Ditinjau dari kecepatan *peripheral*, dimana kecepatan *peripheral* berpengaruh terhadap karakteristik aliran *liquid film* di disk, sesuai dengan **Persamaan 2.16** (Zeevalkink *et al.*, 1978). Dibawah ini dijelaskan pada **Gambar 4.2.** nilai ketebalan *liquid film* sebagai fungsi dari kecepatan *peripheral*.



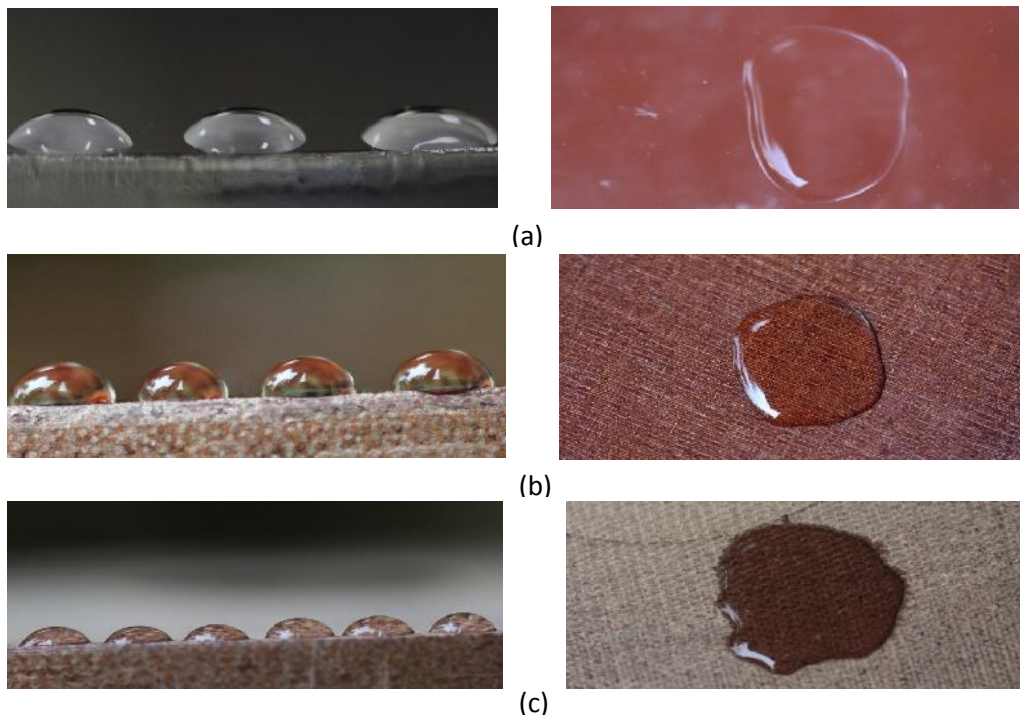
Gambar 4.2. Grafik hubungan δ dengan nilai V_c pada bahan (a) *acrylic*; (b) *novotex O*; (c) *novotex I*

Dari **Gambar 4.2.** didapatkan bahwa untuk permukaan hidrofobik, yaitu *acrylic* dan *novotex O*, hubungan δ dengan V_c adalah non linier. Sedangkan di material *novotex I*, hubungan δ dengan V_c adalah linier, sesuai dengan penelitian Zeevalkink *et al.*, 1978.

Setelah pembahasan tentang pengaruh komponen kecepatan, maka selanjutnya akan dibahas pengaruh dari kekasaran permukaan terhadap ketebalan *liquid film*.

4.1.1.2. Pengaruh Kekasaran Permukaan Terhadap Ketebalan *Liquid Film* Di Disk Permukaan Datar

Penentuan karakteristik *liquid film*, perlu memperhitungkan faktor kekasaran permukaan. Untuk memperjelas pengaruh kekasaran permukaan terhadap ketebalan *liquid film*, dilakukan dokumentasi tetesan air di permukaan material disk uji, dijelaskan pada **Gambar 4.3**.

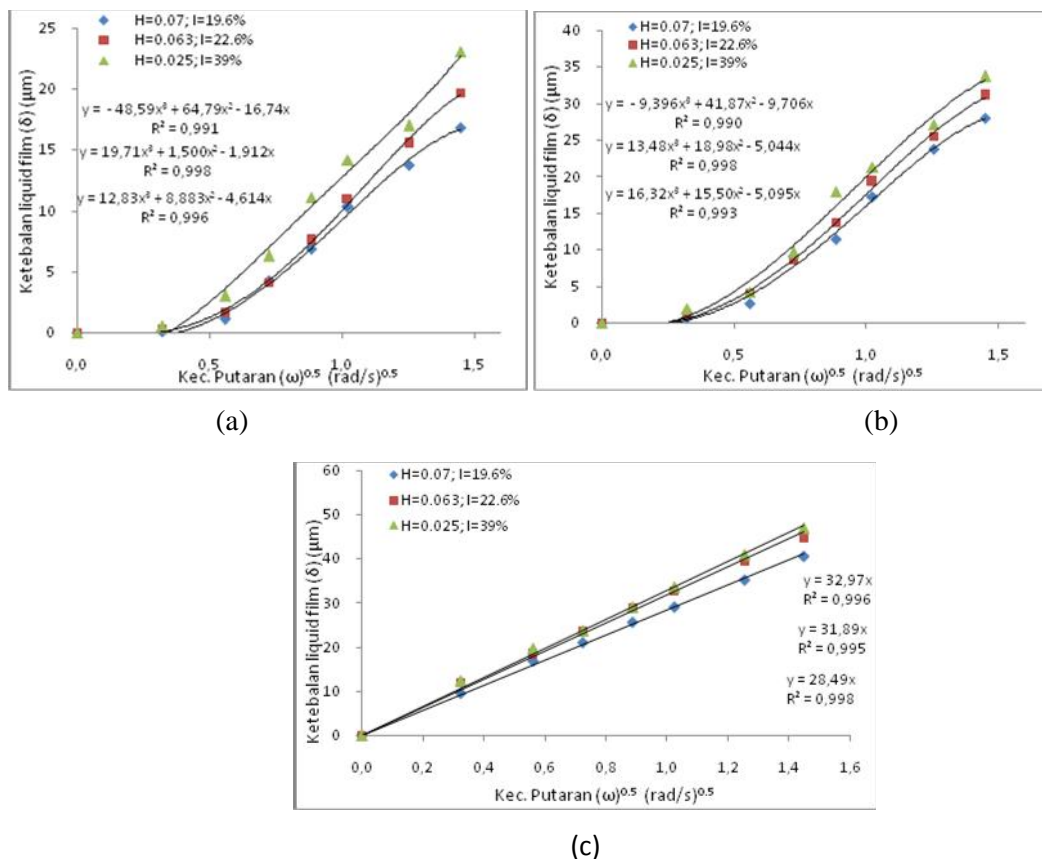


Gambar 4.3. Visualisasi Air di Permukaan Disk, (a) *acrylic*;(b) *novotex O*;(c) *novotex I*

Pada **Gambar 4.3**, karakteristik permukaan disk, berkaitan erat dengan kemampuan permukaan tersebut menggeret (*drag out*) sejumlah air saat keluar dari permukaan air, dan saat turun ke permukaan air (*drag in*). Karakteristik dari ketiga material yaitu, pada material *acrylic*, air mudah tergelincir saat tergeret disk ke atas. Sedangkan pada material *novotex O*, jauh lebih baik dalam menggeret air dibanding *acrylic*, tetapi pada kecepatan putaran rendah *liquid film* masih sulit menempel pada disk. Material *novotex I*, air tidak

tergelincir. Sehingga jika kecepatan putaran ditingkatkan, ketebalan air terlihat meningkat, sehingga teori yang dijelaskan oleh Zeevalkink *et al.*, 1978 dapat jelas tergambarkan. Jika ditinjau dari faktor *contact angle*. Hasil pengukuran dari visualisasi di atas, secara kasar didapatkan *contact angle* rata-rata, untuk material disk masing-masing, *Acrylic*, $\alpha = 57^\circ$; *novotex O*, $\alpha = 48^\circ$; *novotex I*, $\alpha = 36^\circ$. Pada material jenis *novotex I*, yang tetesan airnya terendah, rata-rata 36° dan hasil penelitian ketebalan *liquid film*nya didapatkan nilai tertinggi dibanding dua material lainnya. Gambar di atas di ambil pada temperatur ruangan pada kisaran $28^\circ\text{C} - 31^\circ\text{C}$, karakteristik air bersih yang digunakan pada $\rho = 0.99681 \text{ gr/cm}^3$; $\nu = 0.8774 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}$. Kondisi ini akan berbeda jika faktor temperatur, *densitas* dan *viscositas* berubah. Karena dalam penelitian Bico *et al.*, 2001 yang menyatakan kondisi hidrofilik pada $\alpha \leq 80^\circ$, di temperatur $19\text{-}20^\circ\text{C}$.

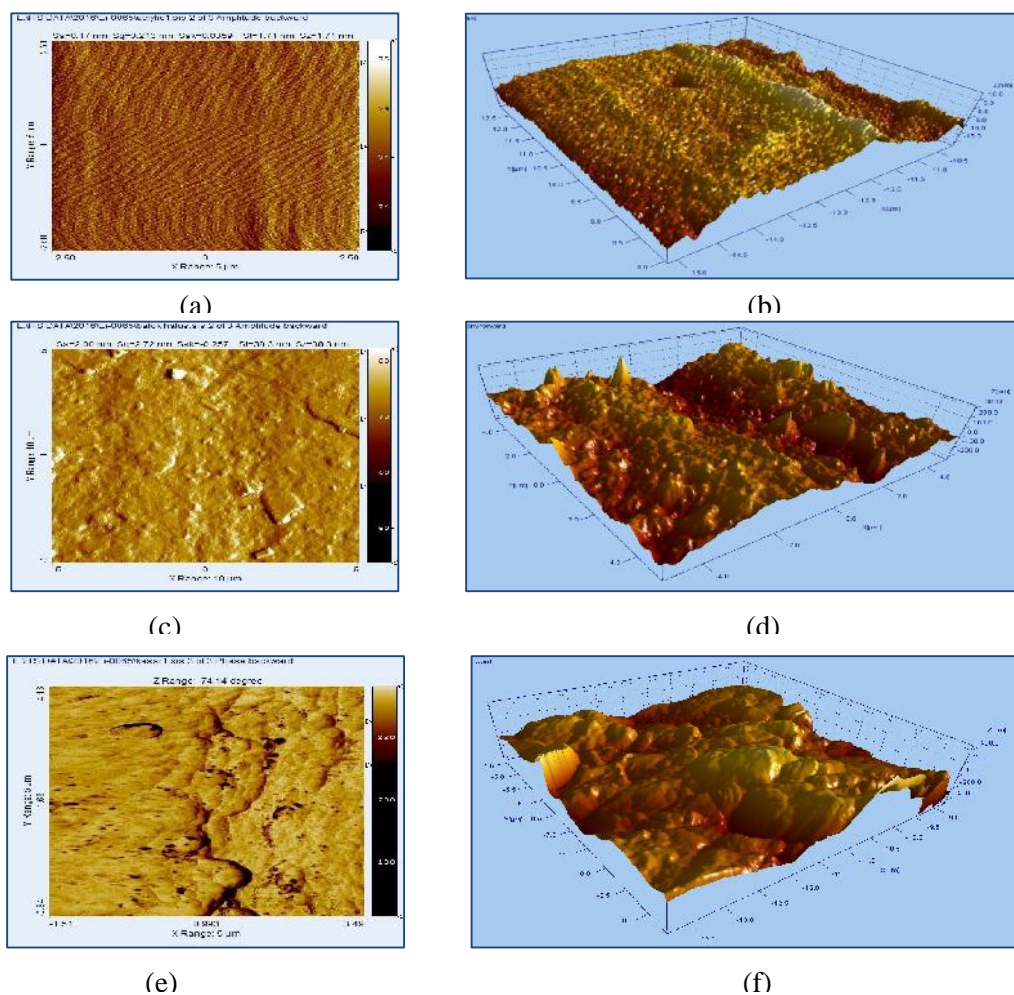
Hubungan kekasaran permukaan terhadap ketebalan *liquid film*, akan diulas lebih lanjut dengan meninjau profil ketebalan *liquid film* pada setiap kekasaran permukaan disk. Hal ini dijelaskan pada **Gambar 4.4.** di bawah ini,



Gambar 4.4. Ketebalan *Liquid Film* Pada (a)*Acrylic*, (b) *Novotex O*, (c) *Novotex I*

Didapatkan hasil kecenderungan ketebalan *liquid film*, di material *acrylic* dan *novotex O*, terhadap kecepatan putaran disk, adalah non linier, sedang pada material *novotex I*, adalah linier.

Dari hasil tersebut diatas, dilakukan karakterisasi permukaan material disk, adalah sebagai evaluasi lanjut dari proses lubrikasi *liquid film* di disk. Salah satu instrumen yang dapat digunakan untuk karakterisasi dalam ukuran nano meter adalah *Atomic Force Mycroscopy* (AFM). Hasil foto AFM dijelaskan dalam **Gambar 4.5**.



Gambar 4.5. Gambar AFM dengan *scan* $5,0 \times 5,0 \sim \text{m}^2$, Tampak dari atas 2D dan 3D, Pada Material: (a&b) *acrylic*, (c&d); *novotex O* (e&f) *novotex I*

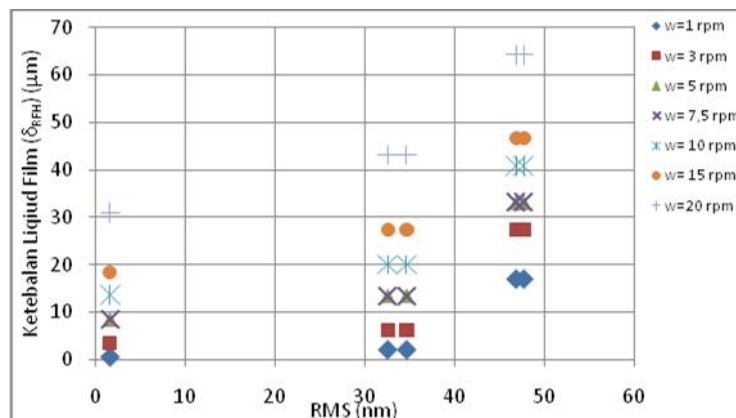
Instrumen ini dipilih, karena mempunyai kemampuan tinggi untuk mempelajari sifat-sifat dan struktur material yang berskala nano (Guriyanova *et al*,

2010). Karakterisasi permukaan material dalam penelitian ini, meliputi : deviasi vertikal kekasaran rata-rata aritmatik (Ra), standar deviasi dari nilai Ra (RMS), tinggi partikel maksimum (Rmax) dan jarak dari ujung puncak ke ujung lembah (PV). Struktur nano dari ketiga material disk diobservasi dari nilai beberapa parameter (**Lampiran 6**). Hasil pengukuran dari parameter yang dianalisis dapat dilihat pada **Tabel.4.2**. Nilai parameter kekasaran pada ketiga material disk.

Tabel.4.2. Parameter kekasaran permukaan material *acrylic, novotex O, novotex I*.

No	Parameter	Nilai parameter kekasaran permukaan (nm)				
		<i>Acrylic</i>	<i>Novotex Outside</i>		<i>Novotex Inside</i>	
1	Ra	2,152	50,907	57,572	88,352	95,262
2	RMS	1,625	32,497	34,593	46,760	47,620
3	Rmax	7,750	117,308	125,443	177,143	190,769
4	PV	14,000	225,000	196,107	328,572	338,461

Pada **Tabel 4.2**. Dari tabel, terlihat bahwa terdapat perbedaan kekasaran permukaan (K_v) dari ketiga bahan disk. nilai kekasaran terendah, terdapat pada bahan *acrylic*. Bahan tersebut nilai Ra, RMS, Rmax dan PV menunjukkan terendah dibandingkan *novotex O* dan *novotex I*, hanya pada kisaran nilai 2.152 nm sedangkan kedua bahan lainnya di atas nilai 50 nm. Pada *novotex I*, memiliki nilai parameter kekasaran tertinggi dari kedua bahan lainnya. Nilai ketebalan *liquid film*-nya tertinggi dibanding kedua bahan lainnya, dengan ketebalan *liquid film* rata-ratanya pada kisaran 17-64 μm .



Gambar 4.6. Hubungan Kekasaran Permukaan (RMS) Dengan Ketebalan *Liquid Film* Rata-Rata (δ_{RFH})

Dijelaskan pada **Gambar 4.6.** pengaruh kekasaran permukaan terhadap ketebalan *liquid film*. Dimana kekasaran permukaan diwakili dengan nilai RMS. Dari hasil karakterisasi tersebut di atas, nilai RMS terendah adalah material *acrylic*, dengan nilai 1.625 nm. Hal ini terbukti pada hasil eksperimen dengan menggunakan material *acrylic*, *liquid film* yang tergeret disk ke atas, pada kecepatan di kecepatan 1-7.5 rpm ketebalannya tidak merata. Sedangkan pada *novotex O*, dimana lapisan terluar *novotex* digunakan sebagai media kontak, nilai RMS pada kisaran 32.497-34.593 nm, nilainya lebih besar dibandingkan dengan kekasaran permukaan media *acrylic*. Nilai kekasaran permukaan pada *novotex I* tertinggi pada nilai RMS 46.760-47.620 nm.

Karakteristik yang berbeda pada ketiga material tersebut, jika dikelompokkan berdasarkan *wettability*, maka material *acrylic* dan *novotex O* bersifat hidrofobik. Sedangkan *novotex I* yang permukaannya berpori, adalah hidrofilik. Pori tersebut memungkinkan adanya *diffusivitas* pada permukaan saja.

Tinggi efektif ketidak teraturan permukaan yang membentuk kekasaran permukaan, yang diwakili oleh nilai R_a , umumnya dalam ilmu hidrolika diistilahkan dengan nilai K_s (angka kekasaran permukaan oleh Nikuradse, pada aliran horizontal penampang terbuka dan tertutup). Tetapi pada penelitian ini, aliran air yang ada diputar secara vertikal, dengan permukaan disk sebagian tenggelam, karakteristik aliran yang berbeda dengan aliran Nikuradse, sehingga disimbolkan nilai K_v , untuk *flat disc*.

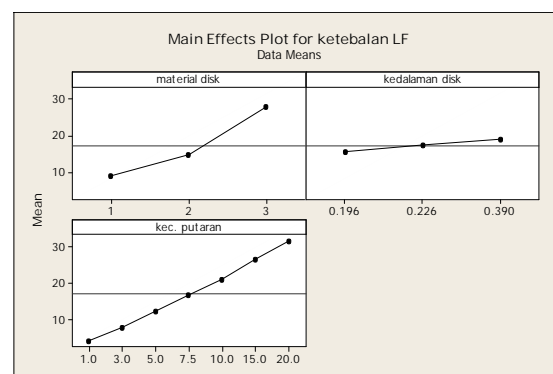
Dari hasil karakterisasi, maka untuk penelitian selanjutnya yaitu *contoured disc* dipilih *novotex O* sebagai material *impermeable* dan *novotex I* yang *permeable*. *Novotex O* dipilih karena memiliki nilai kekasaran permukaan (K_v) lebih besar dibandingkan *acrylic*. Nilai ini menjadikan *liquid film* masih memungkinkan bisa menempel.

Setelah diketahui, ada fenomena pengaruh komponen kecepatan disk dan kekasaran permukaan terhadap ketebalan *liquid film*. Maka akan dilakukan uji statistik untuk menguji pengaruh kedua variabel tersebut diatas serta kecenderungan pengaruhnya terhadap ketebalan *liquid film*.

4.1.1.3. Uji Statistik Pengaruh Komponen Kecepatan dan Kekasaran Permukaan Terhadap Ketebalan *Liquid Film* Di Disk Permukaan Datar

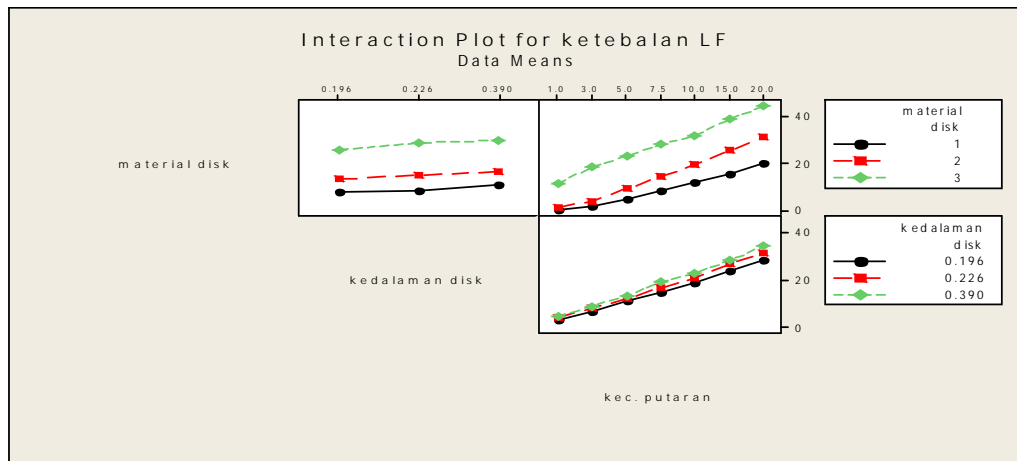
Dalam penelitian ini dipilih uji statistik *unbalanced* desain faktorial untuk 3 faktor. Dipilih desain faktorial, karena untuk menganalisa interaksi antar faktor yang mempengaruhi respon, dan mendeteksi pengaruh perbedaan antar level faktor pada saat bersamaan. Dari penelitian, ada 3 faktor yang dianggap mempengaruhi ketebalan *liquid film*. Yang meliputi: jenis material disk, kecepatan putaran dan kedalaman disk.

Hasil uji faktorial ada dalam **Lampiran 4**. Hasil uji F dan p, hasil *output* ANOVA, didapatkan bahwa kekasaran permukaan dan kecepatan putaran sebagai faktor utama, berpengaruh besar terhadap ketebalan *liquid film*. Sedangkan variabel kedalaman disk, pengaruhnya rendah, Dijelaskan dalam **Gambar 4.7**.



Gambar 4.7. Desain Faktorial Faktor Utama Untuk Ketebalan *Liquid Film*

Dari Gambar 4.7. didapatkan pengaruh dari ketiga variabel bebas tersebut, yaitu material disk (kekasaran permukaan), kedalaman dan kecepatan putaran. Pengaruhnya, jika kekasaran permukaan, kecepatan putaran dan kedalaman disk ditingkatkan maka ketebalan *liquid film* akan meningkat pula. Selanjutnya dilakukan uji antar faktor dan level terhadap ketebalan *liquid film*, dijelaskan di **Gambar 4.8**. Interaksi Antar Faktor dan Level Terhadap Ketebalan *Liquid Film*.



Gambar 4.8. Interaksi Antar Faktor Pada Ketebalan *Liquid Film* Di *Flat Disc*

Didapatkan bahwa material, kedalaman disk dan kecepatan putaran memiliki pengaruh terhadap ketebalan *liquid film*. Dan pengaruh terbesar pada ketebalan *liquid film* adalah kecepatan putaran dan material disk atau kekasaran permukaan. Interaksi antara kekasaran permukaan dan komponen kecepatan disk, secara bersamaan mempengaruhi ketebalan *liquid film* secara signifikan.

Setelah dilakukan uji statistik pengaruh komponen kecepatan dan kekasaran permukaan di *flat disc*, maka pembahasan dilanjutkan pada disk dengan permukaan berkontur. Dimana pembahasan tersebut, juga meliputi fenomena pengaruh komponen kecepatan dan kekasaran permukaan disk terhadap disk permukaan berkontur.

4.1.2. Ketebalan *Liquid Film* di Disk Permukaan Berkontur Berdasarkan Eksperimen





Setelah penelitian secara eksperimen dengan *flat disc*, dimana nilai kekasaran permukaan (K_v) berpengaruh terhadap karakteristik ketebalan *liquid film*. Untuk itu penelitian dilanjutkan untuk mengevaluasi karakteristik ketebalan *liquid film* di permukaan berkontur.

4.1.2.1. Profil Ketebalan *Liquid Film* Di Permukaan Disk Berkontur Berdasarkan Eksperimen

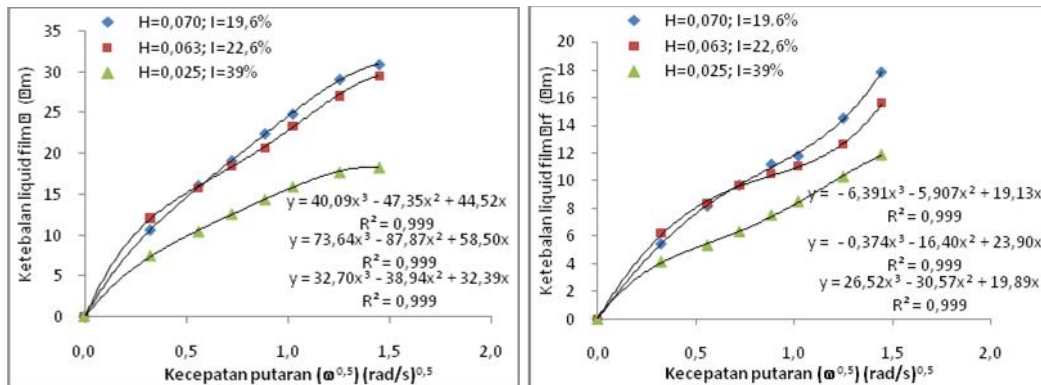
Digunakan dua bahan plastik yang meliputi: *Novotex* dengan lapisan luar (*Novotex O*) dan *Novotex* tanpa lapisan luar (*Novotex I*). Penentuan ketebalan *liquid film* pada saat eksperimen, metoda yang digunakan sama dengan disk

permukaan datar. Dibawah ini disajikan rata-rata ketebalan *liquid film* (δ_{rg1}) terhadap kecepatan putaran disk, disajikan dalam **Tabel 4.3**.

Tabel 4.3. Ketebalan Rata-Rata *Liquid Film* di *Contoured Disc*, Pada $T=26^{\circ}\text{C}$

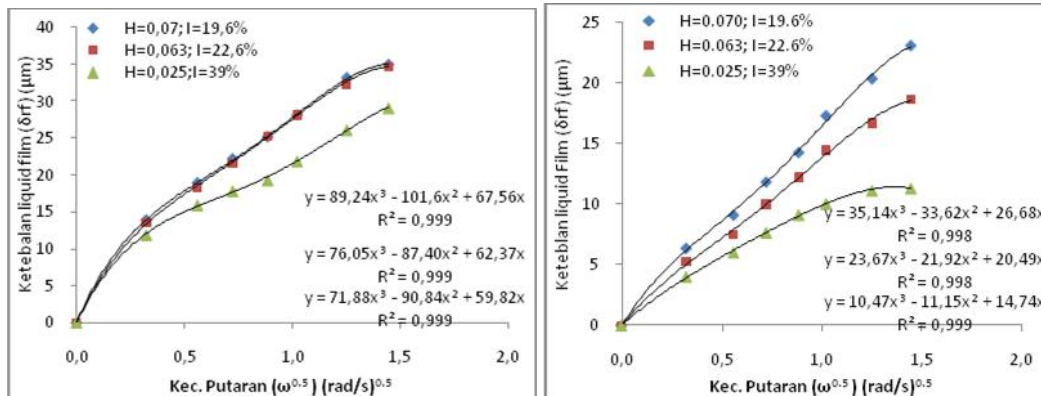
w (rpm)	ω (rad/dt)	ω ^{0.5} (rad/dt) ^{0.5}	l= 19.6%, H= 0.07 m		l= 22.6%, H= 0.063 m		l = 39%, H= 0.025 m	
			δ _{rg1} (μm)		δ _{rg1} (μm)		δ _{rg1} (μm)	
			Novotex O	Novotex I	Novotex O	Novotex I	Novotex O	Novotex I
1. Contoured Disc Tipe 1 								
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,105	0,324	5,443	10,584	6,170	12,073	4,144	7,499
3	0,314	0,560	8,165	16,027	8,317	15,829	5,328	10,459
5	0,524	0,724	9,677	19,051	9,658	18,511	6,315	12,630
7.5	0,785	0,886	11,189	22,378	10,463	20,658	7,499	14,406
10	1,047	1,023	11,794	24,797	10,999	23,340	8,486	15,985
15	1,571	1,253	14,515	29,031	12,609	27,096	10,262	17,761
20	2,094	1,447	17,842	30,845	15,560	29,511	11,841	18,353
2. Contoured Disc Tipe 2 								
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,105	0,324	3,516	9,590	4,803	11,301	2,099	7,346
3	0,314	0,560	6,393	13,745	7,346	16,104	4,827	9,025
5	0,524	0,724	8,631	16,622	9,606	18,646	6,087	11,333
7.5	0,785	0,886	10,229	19,499	11,866	22,602	7,556	13,852
10	1,047	1,023	11,827	22,056	13,561	24,579	9,025	17,000
15	1,571	1,253	14,704	24,933	16,104	28,535	11,334	19,938
20	2,094	1,447 	15,663	27,490	16,386	30,795	12,174	21,407
3. ContouredDisc Tipe 3 								
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,105	0,324	6,212	13,903	5,218	13,568	4,676	11,903
3	0,314	0,560	8,874	18,932	7,567	18,265	6,802	15,941
5	0,524	0,724	11,537	22,186	9,393	21,657	8,715	17,854
7.5	0,785	0,886	13,903	25,144	11,481	25,310	10,415	19,342
10	1,047	1,023	16,861	28,102	13,046	28,180	11,690	21,893
15	1,571	1,253	19,819	33,131	15,655	32,355	12,966	26,144
20	2,094	1,447	22,482	34,906	17,482	34,703	13,178	29,119

Dari **Tabel 4.3**, didapatkan hasil bahwa di tiap tipe disk berkontur, memiliki profil ketebalan *liquid film* yang berbeda-beda. Tetapi memiliki kecenderungan jika kecepatan putaran diperbesar (dalam penelitian ini maksimum 20 rpm) maka ketebalan *liquid film* pun meningkat. Akan lebih jelas jika digambarkan pada **Gambar 4.9**. Ketebalan *liquid film* pada tiap tipe variasi disk.



(c) Disk Kontur Tipe 2, Novotex I

(d) Disk Kontur Tipe 2, Novotex O



(e) Disk Kontur Tipe 3, Novotex I

(f) Disk Kontur Tipe 3, Novotex O

Gambar 4.9. Ketebalan *Liquid Film* di Disk Berkontur Tipe 1,2,3

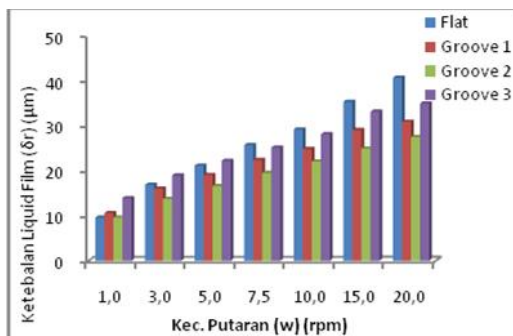
Dari **Gambar 4.9** didapatkan profil ketebalan *liquid film* di permukaan disk berkontur, terhadap kecepatan putaran ($\omega=1-20$ rpm), dari hasil penelitian adalah non linier, bentuk polinomial. Tetapi, untuk kecepatan putaran 1-10 rpm, fenomena ketebalan *liquid film* di *contoured disc* adalah linier, berlaku untuk semua material disk.

Fenomena hubungan ketebalan *liquid film* dengan kecepatan putaran, dari hasil penelitian adalah sesuai dengan disk permukaan datar. Fenomena yang berbeda dengan disk datar, adalah hubungan ketebalan *liquid film* dengan kedalaman disk. Pada disk permukaan datar, kedalaman disk $H=0.025$ m ketebalan *liquid film* tertinggi. Tetapi di *contoured disc*, untuk tipe 1, ketebalan terbesar di $H = 0.07$ m, tipe 2 dan 3, ketebalan terbesar di $H= 0.063$ m.

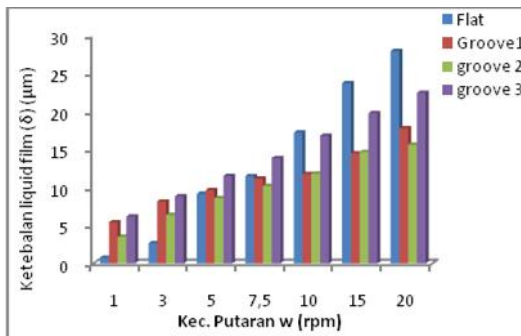
Dari hasil pengukuran ketebalan *liquid film* di *contoured disc*, maka akan dilakukan perbandingan ketebalan *liquid film* di *flat disc* dengan di *contoured disc*, yang dibahas di sub bab 4.1.2.2. di bawah ini.

4.1.2.2. Ketebalan *Liquid Film* di *Flat Disc* Dibanding Dengan *Contoured Disc*

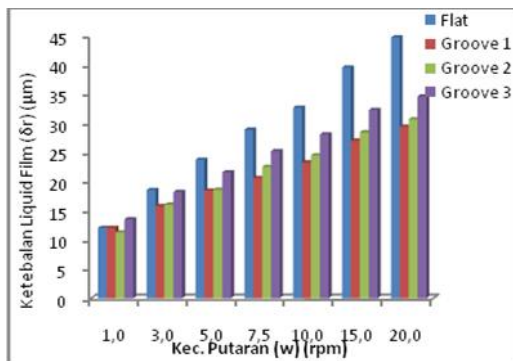
Pada sub bab ini, menganalisa ketebalan *liquid film* permukaan datar dibandingkan dengan berkontur. Dijelaskan dalam **Gambar 4.10**. Profil ketebalan *liquid film* pada ke tiga tipe disk, disajikan dalam grafik batang



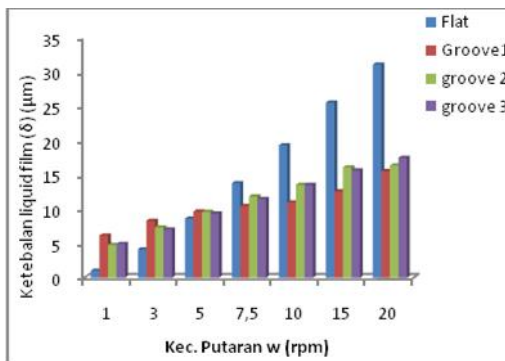
(a) *Novotex I*, $I=19.6\%$



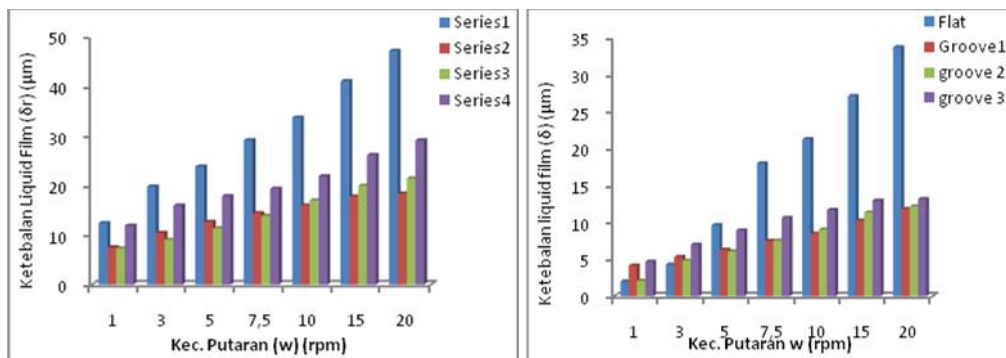
(b) *Novotex O*, $I=19.6\%$



(c) *Novotex I*, $I=22.6\%$



(d) *Novotex O*, $I=22.6\%$



(e) *Novotex I*, I=39%

(f) *Novotex O*, I=39%

Gambar 4.10. Ketebalan *Liquid Film* Di Disk Datar dan Disk Berkontur

Dari **Gambar 4.10.** Di disk permukaan berkontur, berdasarkan kecepatan putaran, nilai rata-rata ketebalan *liquid film*nya, lebih rendah dibandingkan dengan *flat disc*. Dan peningkatan ketebalan *liquid film*nya, mengalami perlambatan di kecepatan di 20 rpm, fenomena tersebut berbeda dengan aliran *liquid film* di *flat disk*, yang semakin meningkat tajam pada kecepatan tersebut.

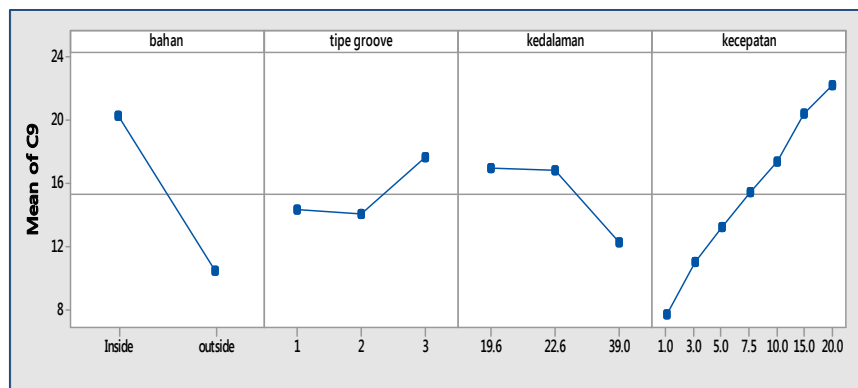
Terdapat beberapa hal dari membandingkan profil ketebalan *liquid film* di *flat disc* dengan *contoured disc*, yaitu :

- Ketebalan *liquid film* pada disk datar untuk material *novotex I*, lebih tebal dibandingkan disk berkontur.
- Tetapi untuk material *novotex O* yang permukaannya hydrofobik, pada kecepatan putaran rendah (1 dan 7.5 rpm) ketebalan *liquid film*nya di disk berkontur masih lebih tebal dibandingkan disk permukaan datar.
- Di semua kedalaman disk, ketebalan *liquid film* di disk berkontur tipe 3 lebih tebal dibanding disk berkontur lainnya.

Setelah diketahui dari hasil eksperimen pada disk berkontur, karakteristik hubungan ketebalan *liquid film* dengan komponen kecepatan dan kekasaran permukaan disk. Dibawah ini akan dibahas data hasil eksperimen yang dilakukan uji statistik untuk mengetahui pengaruh komponen kecepatan dan dan kekasaran permukaan disk terhadap ketebalan *liquid film* di disk berkontur.

4.1.2.3. Uji Hubungan Komponen Kecepatan dan Kekasaran Permukaan Terhadap Ketebalan *Liquid Film* Di Disk Permukaan Berkontur

Dalam penelitian ini dipilih uji statistik *unbalanced* desain faktorial untuk 3 faktor, uji yang sama dilakukan pada disk permukaan datar. Untuk disk permukaan berkontur, ada 4 faktor yang dianggap mempengaruhi ketebalan *liquid film*. Yang meliputi: jenis material disk, kecepatan putaran, kedalaman disk dan tipe *contoured disc*. Hasil uji faktorial untuk disk permukaan berkontur, terdapat dalam **Lampiran 4**. Hasil uji F dan p, hasil *out put* ANOVA, didapatkan bahwa keempat variabel diatas berpengaruh pada ketebalan *liquid film*. Selanjutnya dilakukan uji antar faktor dan level terhadap ketebalan *liquid film*, dijelaskan di **Gambar 4.11**. Pengaruh utama dari masing-masing variabel terhadap ketebalan *liquid film*

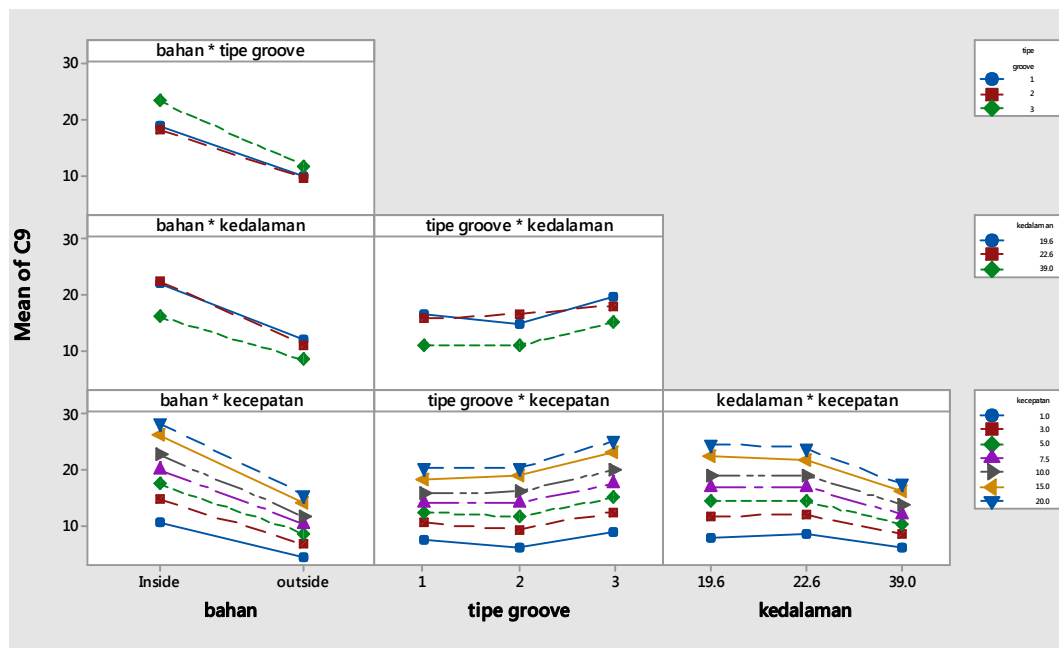


Gambar 4.11. Pengaruh Faktor Utama Terhadap Ketebalan *Liquid Film*.

Dari hasil uji pada disk berkontur, pada **Gambar 4.11** diperoleh bahwa yang tinggi ketebalan *liquid film*nya:

- Ditinjau dari bahan disk : bahan *novotex I* lebih tinggi dari *novotex O*
- Ditinjau dari tipe disk berkontur : tipe 3 tertinggi
- Ditinjau dari kedalaman disk, I= 19.6%, 22.6% .tertinggi dibanding 39%
- Ditinjau dari kecepatan putaran : kecepatan putaran 7.5 - 20 rpm kecepatan tertinggi

Sedangkan interaksi pada tiap variabel terhadap ketebalan *liquid film* dijelaskan pada uji berikutnya di **Gambar 4.12**. Interaksi antar variabel.



Gambar 4.12. Interaksi Antar Faktor dan Level Terhadap Ketebalan *Liquid Film* Di Disk Permukaan Berkontur

Hasil uji didapatkan bahwa jenis material, tipe permukaan berkontur, kedalaman disk dan kecepatan putaran, memiliki pengaruh terhadap ketebalan *liquid film*. Dan keempat faktor tersebut secara bersamaan mempengaruhi ketebalan *liquid film* secara signifikan, di disk permukaan berkontur.

Setelah didapatkan dari hasil eksperimental bahwa ada pengaruh kekasaran permukaan (K_{vg}) dan komponen kecepatan disk (ω , R dan H) terhadap ketebalan *liquid film* (δ). Maka perlunya dilakukan analisis lanjutan, untuk mengetahui bagaimana hubungan dari variabel independen di atas terhadap ketebalan *liquid film* di RBC.

4.1.3. Model Empirik Estimasi Ketebalan *Liquid Film* di RBC

Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini, menggunakan model empirik Analisis dimensional metoda Buckingham- π . Di bawah ini, dibahas lebih lanjut, membanun model empirik Analisis Dimensi untuk estimasi ketebalan *liquid film* di *flat* dan *contoured disc*. Dibedakan model empirik antara *flat* dan *contoured disc*, karena pada kedua permukaan tersebut memiliki karakteristik yang berbeda dalam menggeret *liquid film*.

4.1.3.1. Model Empirik Ketebalan *Liquid Film* di Disk Permukaan Datar

Yang menjadi titik perhatian dalam penelitian ini, adalah aliran *liquid film* di disk yang berputar secara vertikal dan tenggelam sebagian di dalam air. Di beberapa literatur (Avanasiev *et al.*, 2008; Miah *et al.*, 2016; Zeevalkink *et al.*, 1977), menjelaskan faktor - faktor yang berpengaruh terhadap ketebalan *liquid film* di RBC : karakteristik air (μ , ρ , σ), jari-jari disk (R), diameter disk (D), kecepatan putaran disk (ω), H (jarak muka air di *bulk* terhadap poros disk).

Dalam penelitian ini, selain parameter yang sudah ada diatas, juga diperhitungkan parameter kekasaran permukaan (K_v). Nilai K_v berkaitan dengan kekasaran permukaan dengan ukuran nano meter sehingga masih diklasifikasikan licin hidraulis (Anggrahini, 2005). Nilai K_v berhubungan langsung dengan material disk. Material disk yang digunakan berdasarkan *wettability* terbagi menjadi 2, hidrofilik dan hidrofobik. Dalam penelitian ini, sifat material hidrofilik, adalah material *novotex I*, sedangkan sifat material hidrofobik, adalah *acrylic* dan *novotex O*. Nilai K_v sudah dibahas dalam **Sub bab 4.1.1.2, Tabel 4.2**.

Penelitian ini dibatasi pada kecepatan putaran 10 rpm, karena pada kisaran 1-10 rpm, sifat aliran adalah laminar dan *biofilm* dapat melekat dengan baik di permukaan disk pada kisaran kecepatan putaran tersebut (Ghazimoradi dan James, 2003).

Dari hasil perhitungan analisis dimensi (detail perhitungan dijelaskan di **Lampiran 8**), didapatkan bahwa ketebalan *liquid film* dipengaruhi oleh bilangan tak berdimensi (N_{Re}, N_{Fr}, Ca), rasio kedalaman disk dengan jari-jari disk (H/R) dan kekasaran permukaan (K_v). Didapatkan hasil, penentuan ketebalan *liquid film* di *flat disc* dengan metoda Analisa Dimensi, dalam **Persamaan 4.1**:

$$\delta_f = k_0 (N_{Re} \times N_{Fr})^{-k_1} (Ca)^{k_2} (K_v)^{k_3} \left(\frac{H}{R} \right)^{-k_4} \dots\dots\dots (4.1)$$

Dengan :

- Number of Reynolds : $N_{Re} = \frac{D^2 \omega \rho}{\mu}$
- Number of Froude : $N_{Fr} = \frac{\omega^2 D}{g}$
- Number of Capillary : $Ca = \frac{\omega \mu R}{\sigma}$
- Kekasaran permukaan : K_v (nm)
- Kedalaman disk terhadap permukaan air : H/R

Dari Persamaan 4.1., dapat dijelaskan bahwa aliran *liquid film* yang tergeret disk saat berputar ke atas, membawa *liquid film*, mengindikasikan bahwa terdapat pengaruh viskositas terhadap ketebalan *liquid film*. Peningkatan viskositas menyebabkan ketebalan *film* rata-rata meningkat pula, mengindikasikan *number of Reynolds* (N_{Re}) menjadi parameter penting yang tidak bersatuan dalam menganalisa aliran *liquid film*. Sedang *liquid film* menuju permukaan air bebas (*free surface*), akibat gaya gravitasi dapat dikarakterisasi dengan *number of Froude* (N_{Fr}). Karena *liquid film* melibatkan *free surface*, maka tegangan permukaan (*surface tension*) berperan penting dalam mengatur permukaan *liquid*. Maka ada faktor *pressure*, yang didefinisikan sebagai : $P = F/A$ dengan F sebagai gaya dan A sebagai luas permukaan (Miah *et al.*, 2016). Efek dari tegangan permukaan dalam profil ketebalan *liquid film* dapat diindikasikan dari *Capillary number* (Ca). Di beberapa literatur nilai Ca pada kondisi di *rotating vertically disk* ini, nilainya sangat kecil kurang dari 1, tetapi nilainya tidak bisa diabaikan dalam menentukan ketebalan *liquid film* (Zeevalkink *et al.*, 1978; Afanasiev *et al.*, 2010; Miah *et al.*, 2016)

Nilai kekasaran permukaan (K_v) dalam perumusan ini, berperan penting dalam kemampuan menempelnya *liquid film* pada permukaan disk. Nilai K_v yang semakin besar, mengindikasikan permukaan disk semakin kasar, sehingga *liquid film* mampu dengan sempurna menempel pada permukaannya. Pada situasi dimana *liquid film* menempel dan tergeret disk, saat disk berputar ke atas meninggalkan permukaan air. Maka dibutuhkan permukaan disk yang mampu membuat *liquid film* menempel dan tergeret dengan sempurna. Dalam penelitian ini, nilai K_v semakin besar, menghasilkan ketebalan *liquid film* semakin besar pula. Untuk itu, permukaan disk berperan penting terhadap ketebalan *liquid film*.

Pengaruh kedalaman disk pada permukaan air di bak reaktor (H/R), terhadap ketebalan *liquid film* juga berperan penting. Karena pada *flat disc*, perbedaan kedalaman disk terhadap permukaan air, menyebabkan perbedaan ketebalan *liquid film* yang signifikan. Semakin besar nilai H/R , menyebabkan ketebalan *liquid film* semakin rendah.

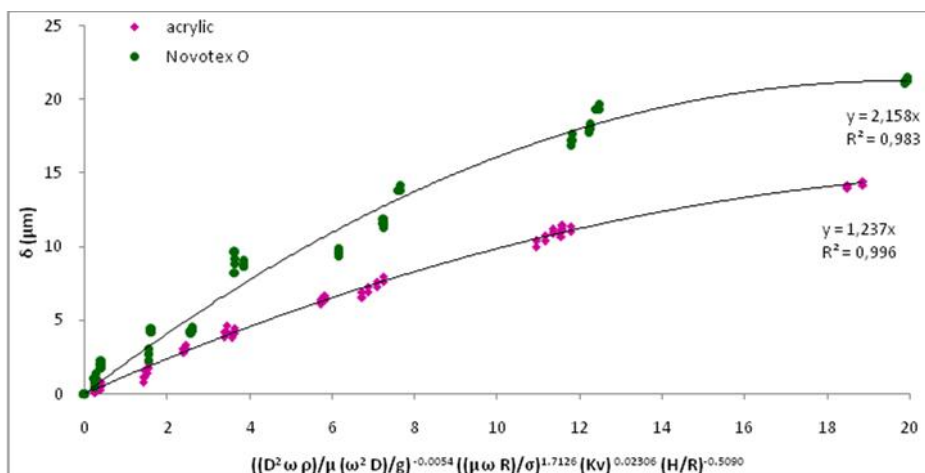
Dengan menggunakan **Persamaan 4.1**, untuk menetapkan koefisien di tiap parameter bebas (*best fitting*) hasil simulasi menggunakan regresi linier

berganda. Dari hasil simulasi, didapatkan uji normalitas data dan uji korelasi parameter bebas terhadap ketebalan *liquid film*. Menggunakan data dengan pengulangan 4 kali, kecepatan putaran yang digunakan 1, 3, 5, 7.5 dan 10 rpm, 3 variasi kedalaman (H : 70; 63 dan 25 mm), 3 variasi kekasaran permukaan, $K_{V-acrylic}$ = 2.152 & 2.158 nm; $K_{V-nov O}$ = 50.907 & 57.572 nm; $K_{V-nov I}$ = 88.352 & 95.262 nm. Dibawah ini, pada **Tabel 4.4.** koefisien untuk δ *Flat Disc*

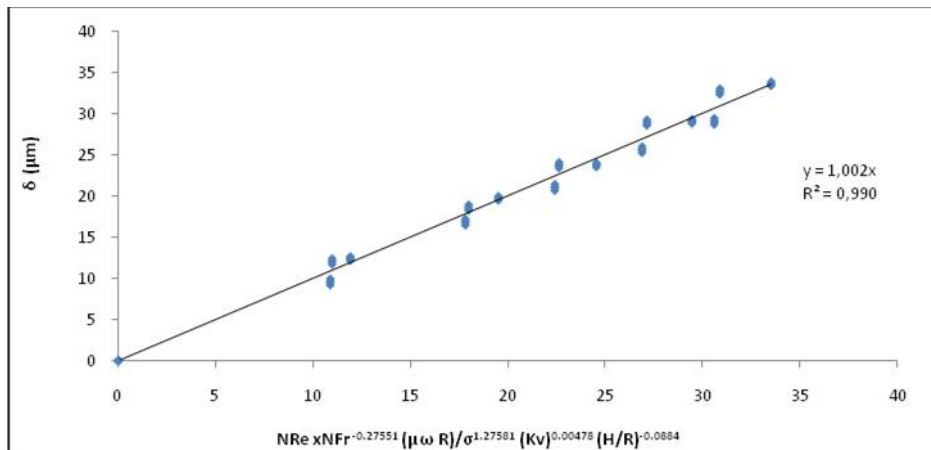
Tabel 4.4. Koefisien Hasil Simulasi Regresi Linier Berganda Untuk δ di *Flat Disc*

No.	Konstanta	Jenis Material Disk		
		<i>Acrylic</i>	<i>Novotex O</i>	<i>Novotex I</i>
1	K_0	0.9010	0.9893	1.0020
2	K_1	-0.0054	-0.0946	-0.2755
3	K_2	1.7126	1.5504	1.2758
4	K_3	0.0231	0.0169	0.0048
5	K_4	-0.5090	-0.3069	-0.0884
6	Koefisien determinasi (R^2) Rasio $\delta_{\text{experimen}}$ vs δ_{rumusan}	99.60%	98.10%	99.00%
7	Tipe	Polinomial orde 2	Polinomial orde 2	Regresi linier

Dengan mensubstitusi nilai konstanta pada **Tabel 4.4** terhadap **Persamaan 4.2.**, didapatkan perhitungan ketebalan aliran *liquid film* di disk permukaan datar. Dilakukan uji kedekatan data untuk material hidrofobik (*acrylic* dan *novotex O*), didapatkan kedekatan data kedua material dengan rumus untuk acrylic (*acrylic* 99.6% dan *novotex O*, 98.3%), dijelaskan dalam **Gambar 4.13**



(a)



(b)

Gambar 4.13. Hasil Uji Kedekatan Data Pada Material (a) Hidrofobik (*acrylic-novotex O*); (b) Hidrofilik (*novotex I*)

Sehingga model untuk *liquid film*, dapat diestimasi pada **Persamaan 4.2** dan **4.3**, di bawah ini :

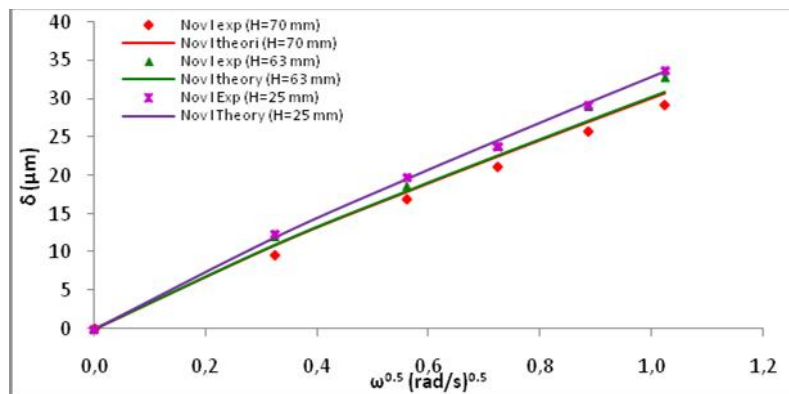
a. Pada material hidrofilik ($K_v \geq 80$ nm), *novotex I* :

$$\delta_{f-NI} = 1.002 \frac{(Ca)^{1.27551} (Kv)^{0.00478}}{(N_{Re} N_{Fr})^{0.27551} \left(\frac{H}{R}\right)^{0.0884}} \dots\dots\dots (4.2)$$

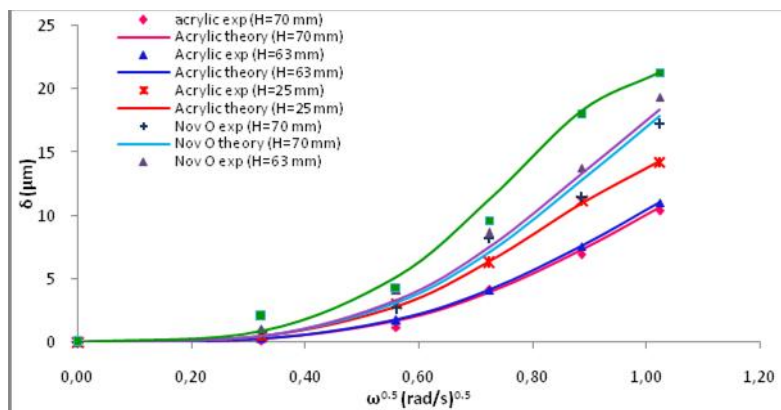
b. Pada material hidrofobik ($K_v \leq 80$ nm), *novotex O* dan *acrylic*,

$$\delta_{f-AO} = -0.0254 \left(\frac{(Ca)^{1.7126} (Kv)^{0.02306}}{(N_{Re} N_{Fr})^{0.0054} \left(\frac{H}{R}\right)^{0.5090}} \right)^2 + 1.2374 \left(\frac{(Ca)^{1.7126} (Kv)^{0.02306}}{(N_{Re} N_{Fr})^{0.0054} \left(\frac{H}{R}\right)^{0.5090}} \right) \dots\dots\dots (4.3)$$

Didapatkan hasil untuk masing-masing material, nilai determinasi $R^2 = 99\%$ (*novotex I*); $R^2 = 98.3\%$ (*novotex O*); $R^2 = 99.6\%$ (*acrylic*). Terdapat korelasi tiap parameter terhadap ketebalan *liquid film*, dibuktikan dengan *p value* kurang dari 0.05, dan tidak terjadi multikolinier antar parameter, dibuktikan dengan nilai $VIF < 10$ (**Lampiran 10**). Rumus yang dihasilkan, cukup signifikan, pada koefisien determinasi diatas 98%. Terdapat perbedaan rumus terbangun pada material yang bersifat hidrofobik (*acrylic* dan *novotex O*) dengan hidrofilik (*novotex I*). Pada material hidrofobik, prediksi model lebih dekat dengan polinomial orde 2, dengan standard error (S) *acrylic* sebesar 0.904277 dan *novotex O* sebesar 0.270599. Sedang pada material hidrofilik, *novotex I* nilai S sebesar 1.04996, lebih dekat dengan regresi linier. Hal ini dapat dilihat pada **Gambar 4.14** di bawah ini.



(a)



(b)

Gambar 4.14. Nilai δ Eksperimen Dengan δ Model, Metoda Analisis Dimensi, Di Material (a) hidrofilik (*novotex I*); (b) hidrofobik (*novotex O* dan *Acrylic*)

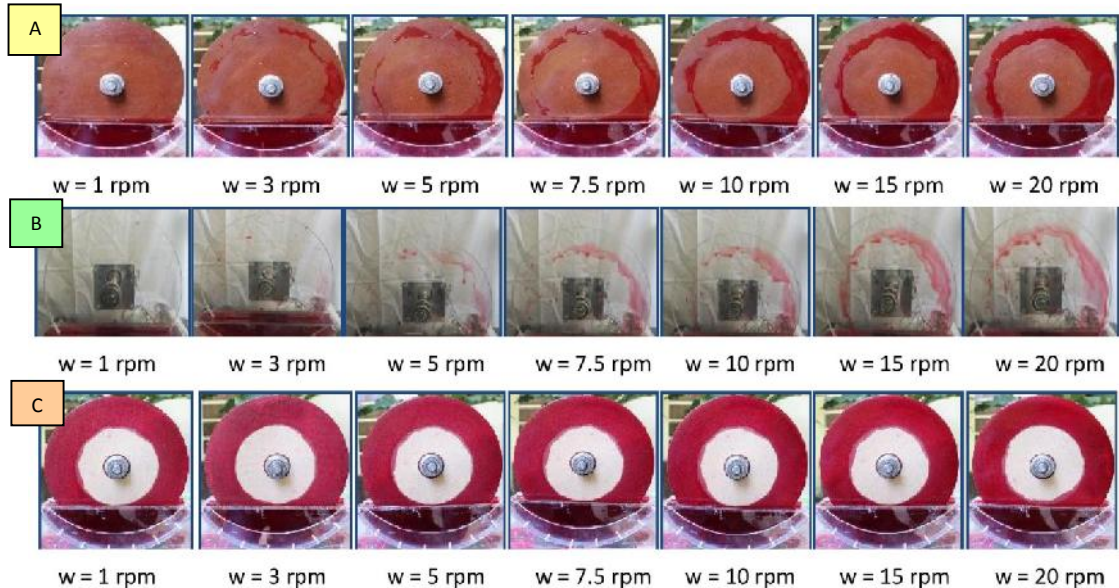
Dari **Gambar 4.14** jika model *liquid film* dihubungkan dengan kecepatan putaran, adopsi dari rumus Zeevalkink *et al.*, 1978 (**Pers. 2.15**), fenomena untuk material yang bersifat hidrofobik, pendekatan yang digunakan regresi linier orde 2, untuk hidrofilik regresi linier. Sedangkan **Persamaan 2.15**, hanya untuk material hidrofilik, dengan pendekatan linier.

Setelah dibangun model estimasi ketebalan liquid film, maka pembahasan dilanjutkan dengan verifikasi model terhadap teori yang ada.

A. Verifikasi Model Ketebalan *Liquid Film* di *Flat Disc*

Verifikasi dalam penelitian ini dilakukan dengan teori yang ada dan dari hasil eksperimen yang sudah dilakukan. Di bawah ini dijelaskan secara lengkap hasil verifikasi model terbangun.

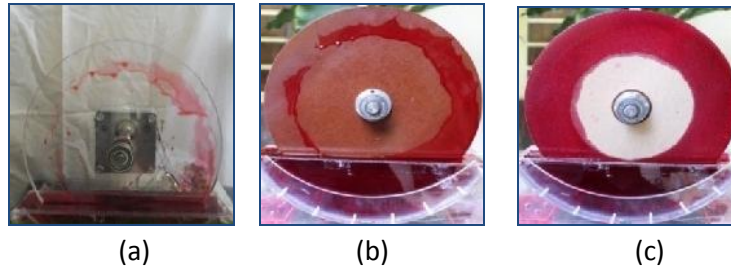
Dari **Persamaan 2.14** dari Bintanja *et al.* 1975 dan **Persamaan 2.16** dari Zeevalkink *et al.*, 1978, menunjukkan bahwa ketebalan *liquid film* dipengaruhi oleh kecepatan putaran (ω). Hal tersebut telah sesuai dengan model yang dibangun. Hal ini dapat lebih jelas, pada **Gambar 4.15** di bawah ini.



Gambar 4.15. Profil Aliran *Liquid Film*, Pada Kecepatan Putaran Yang Berbeda, di 3 Material Disk : (a) *Novotex O*; (b) *Acrylic*; (c) *Novotex I*

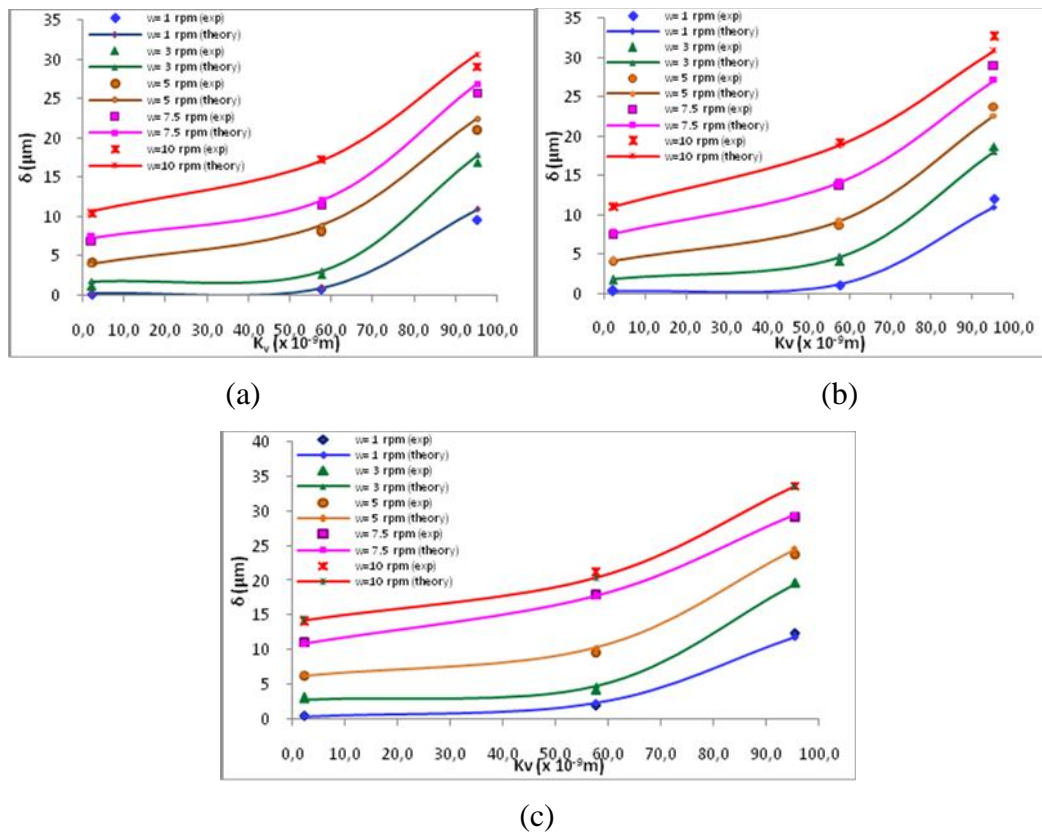
Dapat dilihat pada **Gambar 4.15** di atas, yang menggunakan 3 material di kedalaman $H = 6.3$ cm, dengan meningkatkan kecepatan putaran, ketebalan *liquid film* secara signifikan meningkat.

Dari model *liquid film* juga didapatkan ada pengaruh nilai K_v . Di material *novotex I*, dengan nilai $K_v = 88.352 - 95.262$ dan *contact angle* hasil pengukuran sebesar $\alpha = 36^\circ$, di suhu $26-29^\circ\text{C}$. Sifat dari material ini adalah hidrofilik, *liquid film* yang mengalir di atas permukaannya dapat menempel dengan baik. Pada material *novotex O*, yang memiliki nilai $K_v = 50.91 - 57.572$ nm. Sifat dari material ini adalah hidrofobik, dengan *liquid film* yang mengalir di atas permukaannya kurang bisa menempel dengan baik. Pada material *acrylic*, dengan nilai $K_v = 2.152$ nm dan *contact angle* hasil pengukuran sebesar $\alpha = 48^\circ$, di suhu ruang $26-29^\circ\text{C}$, bersifat hidrofobik. Nilai K_v di *acrylic* terendah dibanding material material sebelumnya, sehingga aliran *liquid film* hanya sebagian kecil yang mampu menempel di disk. Lebih jelasnya dapat dilihat pada **Gambar 4.16** di bawah ini.



Gambar 4.16. Aliran *Liquid Film*, Di Kekasaran Permukaan Berbeda, $H=63$ mm,
Pada $\omega=10$ rpm, Material (a) *Acrylic*; (b) *Novotex O*; (c) *Novotex I*

Dari **Gambar 4.16** dapat dilihat, pada material *acrylic* dan *novotex O*, formasi *liquid film* tidak bisa menempel dengan sempurna. Sedangkan pada *novotex I*, *liquid film* mampu menempel dengan baik sampai di daerah *drag out*. Hal ini membuktikan, faktor K_v berperan penting dalam profil ketebalan *liquid film*. Dibuktikan pula dari hasil eksperimen, pengaruh K_v terhadap ketebalan *liquid film* (δ), pada **Gambar 4.17** Hubungan nilai kekasaran permukaan (K_v) terhadap ketebalan *liquid film* (δ).



Gambar 4.17. Profil Aliran *Liquid Film*, Kekasaran Permukaan Berbeda, di Kedalaman Disk (a) $H=7.0$ cm; (b) $H=6.3$ cm; (c) $H=2.5$ cm

Dari **Gambar 4.17** dapat dijelaskan, ada pengaruh kekasaran permukaan (K_v) terhadap ketebalan *liquid film* (δ) di disk permukaan licin hidraulik. Dalam penelitian ini, dengan meningkatkan nilai K_v (K_v pada kisaran 2.152-95.262 nm) ketebalan *liquid film* (δ) meningkat.

Dari **Gambar 4.17**, juga terlihat tidak ada aliran *liquid film* dari pusat disk ke permukaan air dari tanki RBC. Semakin kedalam disk tenggelam, maka nilai H atau jarak dari pusat disk ke permukaan air, semakin rendah. Dengan semakin rendahnya nilai H , di *flat disc*, nilai ketebalan *liquid film* semakin tinggi. Hal ini membuktikan model terbangun, bahwa kedalaman disk berpengaruh terhadap ketebalan *liquid film*. Fenomena ini, sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Bintanja *et al.*, 1975 dan Zeevalkink *et al.*, 1978.

Setelah dilakukan verifikasi terhadap model terbangun, dilanjutkan validasi model terbangun terhadap literatur lain yang berbeda geometri alat.

B. Validasi Model Ketebalan *Liquid Film* di *Flat Disc*

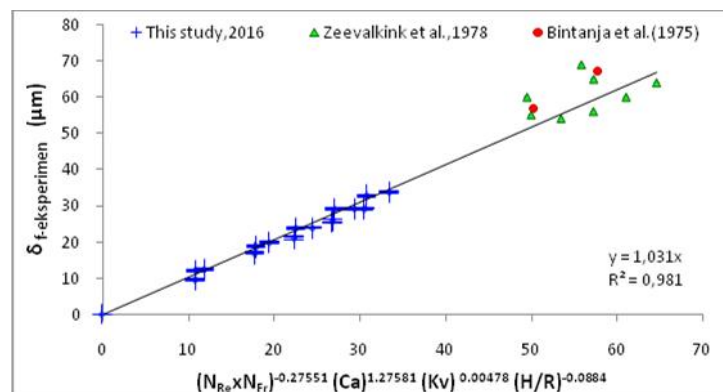
Validasi model dalam penelitian ini, bertujuan untuk menguji model K_{La} terbangun, dengan literatur yang sudah ada. Untuk pengembangan model ketebalan *liquid film* (δ), penelitian sebelumnya yang sejenis diujikan. Dari penelitian Zeevalkink *et al.*, 1978 dan Bintanja *et al.*, 1975, yang menggunakan material *polystyrene* dengan kekasaran permukaan setara dengan *novotex I*. Diambil data dari penelitian yang mengukur ketebalan *liquid film* pada kecepatan putaran 1-10 rpm, karena *biofilm* yang menempel di disk, mampu bekerja secara optimal pada kecepatan tersebut diatas. Kecepatan putaran lebih dari 10 rpm, *biofilm* akan susah melekat di disk.

Parameter terpenting yang berpengaruh terhadap ketebalan *liquid film* pada permukaan disk licin hidraulik, adalah kecepatan putaran (ω) dari disk. Korelasi yang kuat dan positif antara δ dengan ω , sudah dilaporkan secara luas (Bintanja *et al.*, 1975; Zeevalkink *et al.*, 1978; Sanjay, 2007, Miah *et al.*, 2016). Pengaruh kedalaman disk (H), jari-jari disk (R) dan kecepatan vertikal disk (V_c) dilaporkan juga berpengaruh terhadap δ , dijelaskan dalam penelitian Zeevalkink *et al.*, 1978. Dilaporkan dalam penelitiannya bahwa semakin besar nilai H/R , menghasilkan nilai δ yang kecil. Hal ini sesuai dengan data hasil eksperimen

penelitian ini. Dalam penelitian ini, sepakat dengan rumusan yang dihasilkan Bintanja *et al.*, 1975 yaitu pada **Persamaan 2.10**. $\left(\delta = K \left(\frac{\mu \omega R}{\rho g} \right)^{1/2} \right)$. Pada Material *novotex I*, hubungan δ dengan variabel yang ada dalam persamaan 2.10 adalah linier. Tetapi untuk material yang hidrofobik, yaitu *acrylic* dan *novotex O* menghasilkan nilai yang tidak linier (**Gambar 4.5**). Rumusan yang dihasilkan oleh Zeevalkink *et al.*, 1978, yang memperkenalkan pengaruh kecepatan *peripheral* pada ketebalan *liquid film*, **Persamaan 2.13**. $\left(\delta = \frac{4\sqrt{2}}{15} \left(\frac{\eta V_c}{\rho g} \right)^{1/2} \right)$. Dalam penelitiannya, dibuktikan bahwa hubungan δ terhadap kecepatan *peripheral* ($V_c^{0.5}$) adalah linier. Dalam penelitian ini, di material *novotex I*, data eksperimen yang dihasilkan adalah linier, sesuai dengan **Persamaan 2.13**. Tetapi untuk material yang hidrofobik, yaitu *acrylic* dan *novotex O* menghasilkan nilai yang tidak linier, dibuktikan pada **Gambar 4.3**.

Literatur tersebut, material uji yang digunakannya berbeda-beda, sehingga dihasilkan rumus yang berbeda-beda. Belum ada generalisasi untuk memprediksi ketebalan *liquid film* di disk. Untuk itu, dalam penelitian ini ditambahkan faktor kekasaran permukaan, yang memperhitungkan kemampuan suatu permukaan solid untuk mampu terbasahkan oleh *liquid*.

Dalam **Gambar 4.18**, diuji rumus terbangun dengan menggunakan metoda Analisis Dimensi, dengan penelitian sebelumnya. Rumus yang digunakan, menggunakan rumus untuk material yang bersifat hidrofilik, disesuaikan dengan material disk yang digunakan oleh peneliti sebelumnya.



Gambar 4.18. Validasi Ketebalan *Liquid Film*, Model Terbangun Terhadap Data Literatur

Dengan perbedaan desain dan parameter operasional dari literatur tersebut, didapatkan rumus yang dihasilkan, cukup signifikan, pada koefisien determinasi $R^2=98.1\%$ dan standar erorr (S) 2.2018 (dapat dilihat pada **Gambar 4.18**). Rumus yang dihasilkan berhasil memprediksi nilai δ dari literatur, meskipun terdapat perbedaan geometri alat dan parameter operasional.

Analisa dilanjutkan dengan analisis sensitifitas untuk model terbangun, yang bertujuan untuk menunjukkan nilai range dari tiap variabel, yang sesuai untuk model terbangun dalam penelitian ini. Sensitifitas dari tiap variabel grup non dimensionless untuk model *liquid film* di *flat disc*, dapat dilihat pada **Tabel 4.5**. di bawah ini.

Tabel 4.5. Range Parameter Untuk Model *Liquid Film* Terbangun

Parameter	D (m)	W (rpm)	Ad x 10 ⁻² (m ²)	H x 10 ⁻² (m)	Kv x 10 ⁻² (μm)	ω (rad/min)	δ (μm)
Nilai Parameter	0.23 – 0.6	1–10	9.5– 565.5	2.0–17.0	0.22–9.53	0.105–1.047	9.206 – 75.0
<i>Dimensionless Number</i>	$(D^2 \omega \rho) / \mu$	$(\omega^2 D) / g$	$\left(\left(\frac{D^2 \omega \rho}{\mu} \right) \left(\frac{\omega^2 D}{g} \right) \right)$		$(\mu \omega R) / \sigma$	H/R	
Nilai <i>Dimensionless Number</i>	63.14x10 ²	2.57 x10 ⁴	0.0598		0.000013	1.0449	
	3838.39x10 ²	697.82 x10 ⁴	0.9344		0.001010	1.1373	

Dari Tabel di atas, pengaruh dari parameter $\left(\left(\frac{D^2 \omega \rho}{\mu} \right) \left(\frac{\omega^2 D}{g} \right) \right)$, adalah fungsi dari *number of reynolds* dan *number of froude*. Aliran *liquid film* tipis yang tergeret disk saat berputar ke atas, keluar dari permukaan air bebas (*free surface*), dapat dikarakterisasi dengan *number of Froude*. N_{Re} mengindikasikan bahwa terdapat pengaruh gaya inersia dan viskositas.

Liquid film sebagai fungsi $(\mu \omega R) / \sigma$ dipelajari sebagai *capillary number* (Ca), efek dari tegangan permukaan (σ) dalam profil ketebalan *liquid film*. Faktor ini pada kisaran $(0.013 \times 10^{-3} - 1.0 \times 10^{-3})$, nilai yang relatif kecil. Di beberapa literatur nilai Ca di *rotating vertically disk* ini, nilainya sangat kecil kurang dari 1, tetapi nilainya tidak bisa diabaikan dalam menentukan ketebalan *liquid film* (Zeevalkink *et al.*, 1978; Avanasiev *et al.*, 2010; Miah *et al.*, 2016)

Liquid film sebagai fungsi dari (K_v) , yaitu faktor kekasaran suatu permukaan solid. Semakin besar nilai K_v maka ketebalan *liquid film* meningkat. Pada penelitian ini, nilai K_v yang digunakan, pada kisaran (2 – 98 nm).

Liquid film juga sebagai fungsi dari (H/R), yaitu faktor kedalaman disk. Nilai ini pada kisaran 1.0449 – 1.1373. Pengaruh dari kedalaman disk, menunjukkan pendistribusian ketebalan *liquid film* berubah secara signifikan pada kedalaman cairan yang berbeda. Hal ini sepakat dengan hasil yang dilaporkan oleh Bintanja *et al.*, 1975, dan Zeevalkink *et al.*, 1978.

Setelah membangun model empirik untuk mengestimasi ketebalan liquid film di *flat disc*, maka dilanjutkan membangun model di *contoured disc*.

4.1.3.2. Membangun Model Empirik Estimasi Ketebalan Liquid Film di Contoured Disc

Rumusan yang didapatkan dari hasil perhitungan dari di *flat disc* dilanjutkan dengan menentukan rumusan pada *contoured disc*. Dalam penelitian ini, terdapat 3 tipe disk permukaan berkontur, berbentuk kotak dan pola silinder.

Hasil perhitungan analisis dimensi, didapatkan bahwa ketebalan *liquid film* di *contoured disc*, dipengaruhi oleh bilangan tak berdimensi (N_{Re}, N_{Fr}, Ca), rasio kedalaman disk dengan jari-jari disk (H/R), kekasaran di permukaan yang berkontur (K_{vg}), rasio lebar gerigi dengan akumulasi gerigi-jurang (di/dt) dan rasio luas disk basah dengan luas disk total (A_w/A_d). Didapatkan hasil, ada korelasi tiap parameter uji terhadap ketebalan *liquid film* dibuktikan dengan *p-value* kurang dari 0.05, dan tidak terjadi multikolinier antar parameter, dibuktikan dengan nilai VIF < 10, dijelaskan dalam **Persamaan 4.4**.

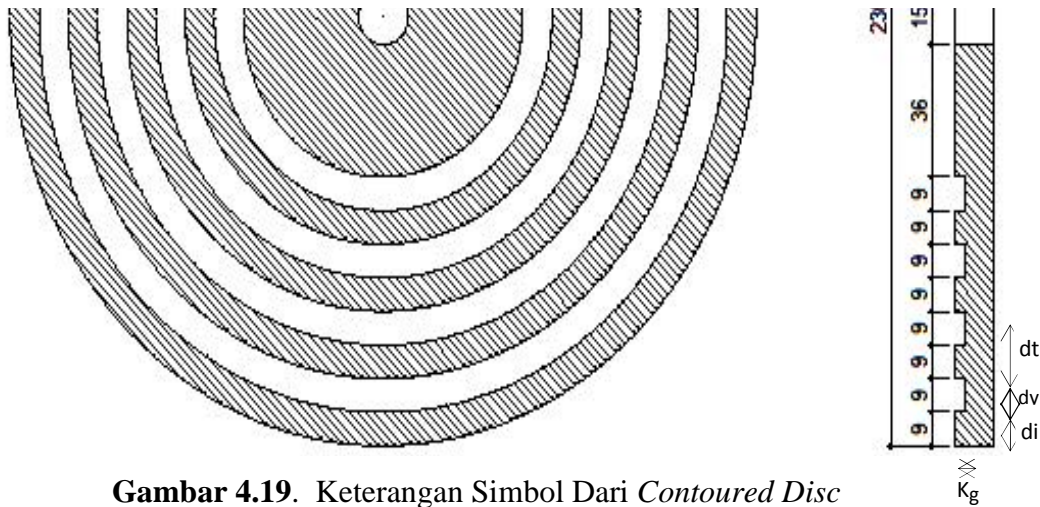
$$\delta_g = k_0 \left(\left(\frac{D^2 \omega \rho}{\mu} \right) \left(\frac{\omega^2 D}{g} \right) \right)^{-k_1} \left(\frac{\mu \omega R}{\sigma} \right)^{k_2} \left((K_{vg}) \left(\frac{A_w}{A_d} \right) \left(\frac{di}{dt} \right) \right)^{k_3} \left(\frac{H}{R} \right)^{-k_4} \dots (4.4)$$

- Dengan :
- *Number of Reynolds* : $N_{Re} = \frac{D^2 \omega \rho}{\mu}$
 - *Number of Froude* : $N_{Fr} = \frac{\omega^2 D}{g}$
 - *Number of Capillary* : $Ca = \frac{\omega \mu R}{\sigma}$
 - Rasio lebar gerigi dengan lebar total gerigi-jurang : $\frac{di}{dt}$
 - Kekasaran permukaan di *contoured disc*: $K_{vg} = K_v \text{ (nm)} + K_g \text{ (mm)}$
 - Rasio *wetted area* dengan luas disk total: (A_w/A_d)
 - Rasio kedalaman disk terhadap permukaan air : H/R

Untuk penentuan karakteristik ketebalan *liquid film*, parameter uji hasil perhitungan analisa dimensi pada *flat disc*, digunakan pada *contoured disc*. Hanya perlu ditambahkan parameter uji, yang meliputi :

- K_{vg} : Faktor kekasaran permukaan berkontur ($K_v + K_g$) (mm)
- A_w : Luas disk basah (*wetted area*) (m^2)
- A_d : Luas disk total (m^2)

Hal ini dijelaskan pada **Gambar 4.19**, keterangan simbol pada *contoured disc*.



Gambar 4.19. Keterangan Simbol Dari *Contoured Disc*

Tabel 4.6. ditampilkan nilai koefisien ketebalan *liquid film* di *contoured disc*.

Tabel 4.6. Nilai Koefisien Hasil Simulasi Regresi Linier Berganda Untuk δ
Contoured Disc

No.	Konstanta	Jenis Material Disk					
		<i>Contoured Disc - Novotex I</i>			<i>Contoured Disc - Novotex O</i>		
		Tip 1	Tip 2	Tip 3	Tip 1	Tip 2	Tip 3
1	K_0	1.0106	1.0148	1.0189	1.0082	1.0386	1.0183
2	K_1	-0.3209	-0.3160	-0.3220	-0.3524	-0.2920	-0.3213
3	K_2	1.2891	1.2991	1.2571	1.3598	1.4129	1.3677
4	K_3	-0.0387	-0.0358	-0.0194	-0.0352	-0.0378	-0.0159
5	K_4	0.3302	0.3177	0.1656	0.3005	0.3352	0.1357
6.	Koefisien determinasi (R^2) Rasio $\delta_{\text{experimen}}$ vs δ_{rumusan}	99.36%	96.84%	99.39%	99.03%	97.07%	98.67%
7.	Tipe	Linier	Linier	Linier	Linier	Linier	Linier

Dengan mensubstitusi nilai konstanta pada **Tabel 4.6** terhadap Persamaan 4.4., didapatkan model ketebalan aliran *liquid film* di disk permukaan berkontur di tiap tipe disk. Disk dengan permukaan berkontur ini, pendekatan modelnya lebih dekat ke linier untuk material yang bersifat hidrofobik, karena pada ω 1- 10 rpm, hasil dari eksperimen relatif linier perubahan ketebalan *liquid film* terhadap kecepatan putaran disk.

Untuk generalisasi model, pada penelitian ini, diuji kedekatan data setiap tipe kontur dan sifat material. Dari hasil uji didapatkan model *liquid film* untuk disk berkontur, dikelompokkan menjadi 2 model, untuk material yang bersifat hidrofilik dan hidrofobik.

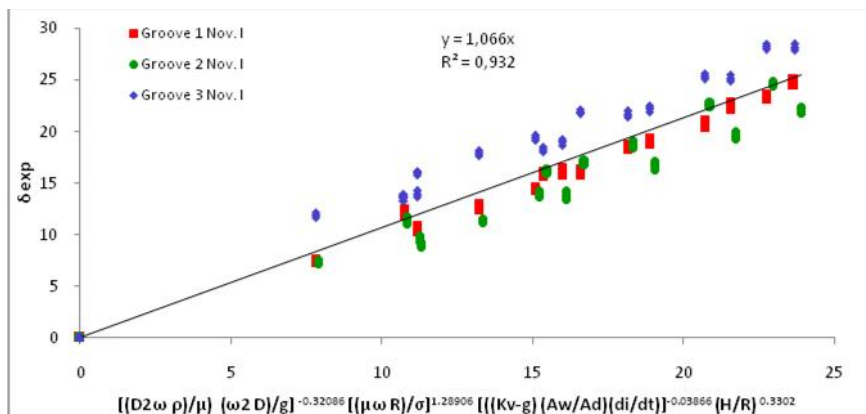
Model 1, model untuk sifat material yang hidrofilik (*novotex I*)

$$\delta_{g1(nI)} = 1.0106 \frac{(Ca)^{1.2591} \left(\frac{H}{R}\right)^{0.3302}}{(N_{Re} \times N_{Fr})^{0.3209} \left((Kv + Kg) \left(\frac{Aw}{Ad}\right) \left(\frac{di}{dt}\right)\right)^{0.0337}} \dots\dots\dots (4.5)$$

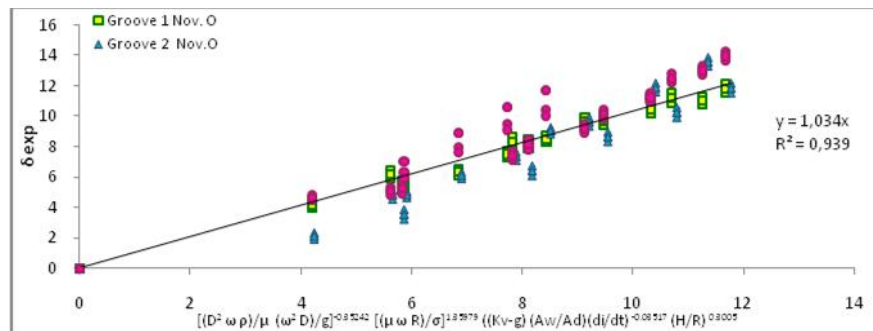
Model 2, untuk disk berkontur di disk bersifat hidrofobik (*novotex O*)

$$\delta_{g1(nO)} = 1.0082 \frac{(Ca)^{1.3598} \left(\frac{H}{R}\right)^{0.3005}}{(N_{Re} \times N_{Fr})^{0.3524} \left((Kv + Kg) \left(\frac{Aw}{Ad}\right) \left(\frac{di}{dt}\right)\right)^{0.0352}} \dots\dots\dots (4.6)$$

Fitting data ketebalan *liquid film* di ketiga tipe *contour disc* pada kedua model **Persamaan 4.5** dan **4.6**, dijelaskan pada **Gambar 4.20** di bawah ini.



(a)



(b)

Gambar 4.20. *Fitting Data Ketebalan Liquid Film di Ketiga Tipe Contoured Disc, (a) Material Hidrofilik ; (b) Material Hidrofobik*

Dari **Gambar 4.20.** hasil dari prediksi ketebalan *liquid film* dari model 1 (standard error 2.10881) dan 2 (standard error 1.00427), masih diatas dari 90% . Sehingga bisa diterima kedua model tersebut (Iriawan, *et al.*, 2006).

Pola dari *Contoured disc* dalam penelitian ini, bentuk kontur yang digunakan adalah kotak dan membentuk radial, sesuai bentuk lingkaran disk. Dengan memvariasi lebar dari tonjolan berbentuk persegi (d_i) dan lebar jurang (d_y). Yang diharapkan ada perbedaan yang signifikan pada ketebalan *liquid film* dengan memvariasi d_i dan d_y , sesuai dengan literatur yang ada (Cervo *et al.*, 2013). Dari hasil penelitian didapatkan untuk pola $d_i = d_y$ (di *contoured disc* tipe 1) nilai ketebalan δ lebih besar daripada $d_y > d_i$ (di *contoured disc* tipe 2), di kecepatan putaran di bawah 7.5 rpm. Sedangkan pada kecepatan putaran di atas 7.5 rpm, ketebalan *liquid film* (δ) lebih besar di pola $d_y > d_i$ dibanding $d_i = d_y$. Bila pola radial tersebut dimodifikasi seperti pada *contoured disc* tipe 3. Maka fenomena yang dihasilkan, ketebalan *liquid film* di *contoured disc* tipe 3 lebih besar daripada pola radial (*contoured disc* tipe 1 dan 2).

Setelah dibangun model empirik untuk ketebalan *liquid film* di RBC, dilanjutkan dengan model numerik berbasis *computational fluid dynamic* (CFD) untuk menganalisa lebih lanjut hidrodinamika aliran *liquid film* di RBC.

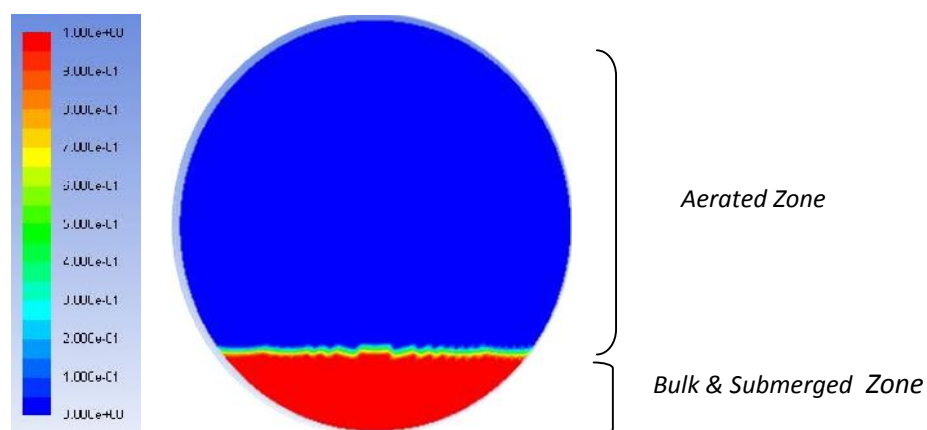
4.1.4. Visualisasi *Liquid Film* Menggunakan Model Numerik Berbasis CFD

Dengan menggunakan *software ANSYS Fluent* 16.2, perhitungan iterasi simulasi CFD menggunakan metoda *Volume of Fluid* (VOF). Faktor-faktor yang berpengaruh terhadap ketebalan *liquid film*, sudah dijelaskan dari penelitian

sebelumnya yang menggunakan CFD (Afanasiev *et al.*, 2008; Miah *et al.*, 2016). Faktor-faktor tersebut yaitu, kecepatan putaran dan viskositas cairan. Dimana profil ketebalan *liquid film* meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan putaran (ω) dan viskositasnya (ρ). Pada pemodelan pembentukan *liquid film*, penting untuk memperhitungkan keseimbangan gaya, sebagaimana bentuk dan stabilitas dari *liquid film* yang dikontrol oleh gaya-gaya. Gaya-gaya tersebut, yaitu gaya viskositas, gaya inersia, gaya centrifugal, gaya tegangan permukaan dan gaya gravitasi (Afanasiev *et al.*, 2008; Miah *et al.*, 2016).

Fluida yang digunakan adalah multifase, yakni fase *liquid* dan gas. Dimana fase *liquid*nya berupa air dan fase gas yang digunakan adalah udara. Simulasi ini menggunakan system *batch*. Tangki yang digunakan berbentuk semi silinder di bagian dasarnya, tangki tersebut berisi *liquid* (cair) dengan permukaan bebas, dimana cairannya terekspose pada *liquid* lain (udara). Dengan diameter tangki sebesar 27 cm dengan disk berdiameter 23 cm yang berputar dalam tangki.

Model komputational ini mendeskripsikan aliran *liquid film* yang tergeret keluar dari permukaan air akibat perputaran disk, dan terekspose di udara. Untuk mendeskripsikan fenomena fisik aliran *liquid film*, digunakan persamaan Navier-Stokes (Afanasiev *et al.*, 2008). Sebagai kondisi awal, sebagian *disk* dibuat tercelup dalam air, dimana jarak poros *disk* dengan permukaan air adalah sebesar 7 cm, sebagaimana ditampilkan pada **Gambar 4.21**.

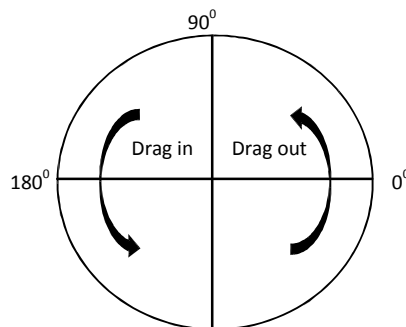


Gambar 4.21. Kondisi Awal Simulasi, Dengan $H=7$ cm

Ada beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam simulasi pembentukan lapisan tipis dari segi fisik yaitu adanya permukaan bebas antara fluida yang

berbeda, adanya gaya tegangan permukaan pada permukaan bebas, dan gaya adhesi, dengan mengatur sudut kontak (*contact angle*) antara dinding *solid* dan tangen antarmuka air-udara pada dinding yang akan terbentuk ketika *liquid droplet* kontak pada permukaan dinding yang *solid*. Pada penelitian sebelumnya aliran *film* tipis dapat dikarakterisasi dengan menggunakan parameter yang tak berdimensi seperti *Capillary Number*, *Froude Number*, *Reynolds Number* dan *Webber Number*.(Miah *et al.*, 2012)

Pembentukan *liquid film* dapat dikarakterisasi oleh dua area yang berbeda sesuai dengan **Gambar 4.22** yang dimana Daerah *drag-in* pada *range* sudut $0^{\circ} < \theta < 90^{\circ}$ sedangkan daerah *drag-out* pada *range* sudut $90^{\circ} < \theta < 180^{\circ}$



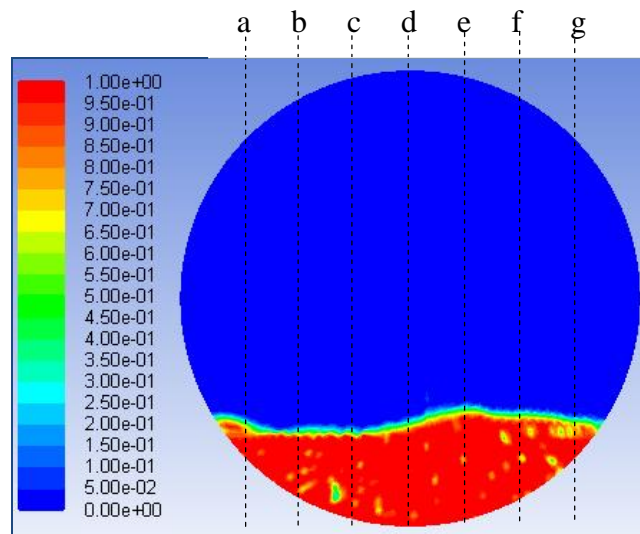
Gambar 4.22 Daerah *drag-in* dan *drag-out*

Pada simulasi ini menggunakan gaya tegangan permukaan air-udara sebesar $0,0728\text{N/m}$. sedangkan sudut kontak yang digunakan sebesar 10° agar terbentuk keadaan yang hidrofilik antara permukaan dinding *solid* dengan fluida, sehingga diharapkan *liquid* dapat terangkat dan menempel dengan baik pada permukaan *disk*.

Salah satu fitur penting dari metode VOF (*Volume of Fluid*) adalah simulasi secara *unsteady*, yang membutuhkan pemilihan *time step* yang tepat sehingga simulasi dapat berjalan secara stabil. Salah satu kriteria yang digunakan untuk menentukan *time step* adalah *Courant Number*. Penggunaan kriteria dalam penentuan *time step* dinamakan *Courant number*. Dalam simulasi pembentukan *liquid film*, penggunaan *Courant number* sekecil mungkin yang memberikan *time step* minimal sebesar 10^{-3} s. (Miah *et al.*, 2012). Dalam simulasi ini digunakan

time step sebesar 10^{-4} s, dengan $\omega = 10 \text{ rpm} = 1,047 \text{ rad/s}$, $H = 7 \text{ cm}$, $R = 11,5 \text{ cm}$ didapatkan $U = 0,12 \text{ m/s}$.

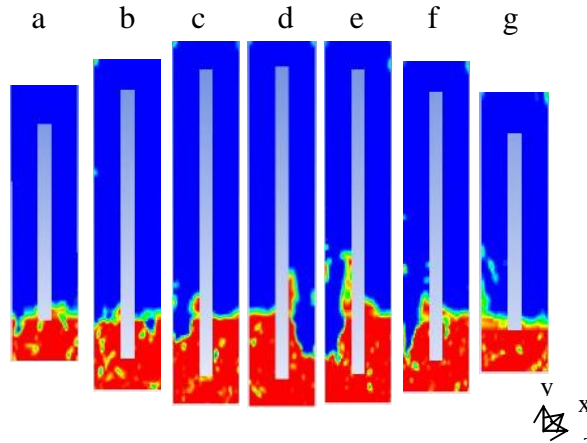
Domain komputasi pada *disk* berupa *hexahedral* yang terdiri 246840 elemen dan 267364 node. *Hexahedral* merupakan komputasi domain yang paling sesuai dalam penggunaan *surface tension*. Dibawah ini pada **Gambar 4.23**. hasil simulasi pada 2.6 detik



Gambar 4.23 Tampak Depan Distribusi Air, Kontur Fraksi Volume Fase Liquid ($\mu=0,001 \text{ kg/m.s}$) Kondisi Transient, ($t = 2,6 \text{ detik}$) (Dibuat Tahun 2016)

Gambar 4.23. menunjukkan hasil simulasi *transient* untuk *disk* halus yang diputar dengan kecepatan 10 rpm dengan viskositas *liquid* 0,001 kg/m.s. Simulasi menunjukkan waktu 2,6 detik, sehingga jika dikonversi telah mencapai 0.43 putaran atau 150° . Dapat dilihat visualisasi tampak depan, terdapat perbedaan permukaan air saat sebelum simulasi (**Gambar 4.22**) dan setelah simulasi (**Gambar 4.23**). Pada Gambar 4.23 tersebut sudah ada perubahan muka air yang sedikit lebih tinggi dari sisi disk sebelah lainnya.

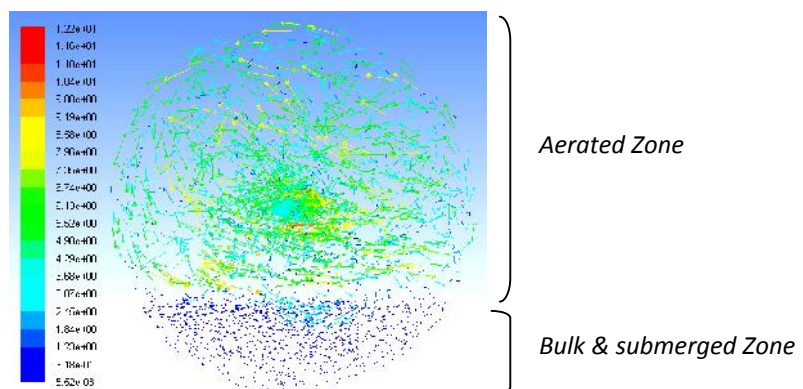
Untuk mempermudah pengamatan terbentuknya *liquid film*, hasil simulasi ditampilkan secara tampak samping untuk 7 bidang pengamatan (a-g). Potongan melintang persegmen (a-g) dari **Gambar 4.23**, akan terlihat lebih jelas naiknya *liquid film* di disk, dapat dilihat pada **Gambar 4.24**,



Gambar 4.24. Distribusi Air Pada Potongan Melintang Disk Per Segmen (a-g), Daerah drag in (a-c) dan drag out (e-g) , pada $t = 2,6$ detik (Dibuat Tahun 2016)

Dari hasil simulasi saat mencapai waktu 2,6 detik menunjukkan bahwa *liquid film* yang terikutkan disk, tetapi tidak merata pada permukaan *disk*. Simulasi pada dasarnya dilanjutkan sampai 10 detik atau lebih dari 1 putaran disk, tetapi kondisi aliran *liquid film* tetap seperti pada kondisi 2.6 detik.

Berdasarkan hasil simulasi, tampak pada bidang e-g level *liquid* lebih tinggi daripada bidang a-c. Hal ini menunjukkan bahwa air mengalami *drag out* (e-g) seperti yang dinyatakan oleh Miah *et al.*, (2012). Pada bidang pengamatan (a) menunjukkan level air terendah yang menunjukkan air mengalami *drag in*. Pada bidang pengamatan (a) mempunyai level terendah dipengaruhi oleh gaya dorong yang disebabkan disk yang berputar. Hal ini akibat gaya gravitasi seperti yang dinyatakan oleh Miah *et al.*, (2012).



Gambar 4. 25. Vektor Aliran Kecepatan Udara (m/dt), Solver Transient pada $t = 2,6$ detik (Dibuat Tahun 2016)

Pergerakan fluida, ini didukung oleh tampilan vektor aliran kecepatan udara pada **Gambar 4.25**. Dimana arah kecepatan aliran udara berlawanan dengan arah jarum jam, sesuai dengan putaran disk yang berlawanan jarum jam.

Dari **Gambar 4.25**, jika dibagi kedalam 2 bidang pengamatan yaitu bidang 1 di *aerated zone* dan bidang 2 *bulk dan submerged zone*. Di bidang 2, kecepatan aliran udara lebih lambat daripada di bidang 1, hal ini membuktikan ada perputaran disk di bidang 1. Kecepatan aliran udara di daerah peripheral disk, lebih cepat aliran udaranya daripada aliran yang semakin mendekati poros disk. Terjadi gradasi kecepatan di *aerated zone*, yang dijelaskan dalam perubahan warna pada tanda panah. Hal ini membuktikan, bahwa di dalam model dari hasil simulasi, bahwa disk berputar. *Liquid film* yang terbentuk, hanya dapat menunjukkan *liquid film* di disk secara kualitatif pada kecepatan 10 rpm, namun belum bisa menunjukkan tebal *film*.

Untuk itu dilakukan evaluasi alasan dari hasil simulasi CFD tersebut, yang akan dijelaskan pada sub bab di bawah ini.

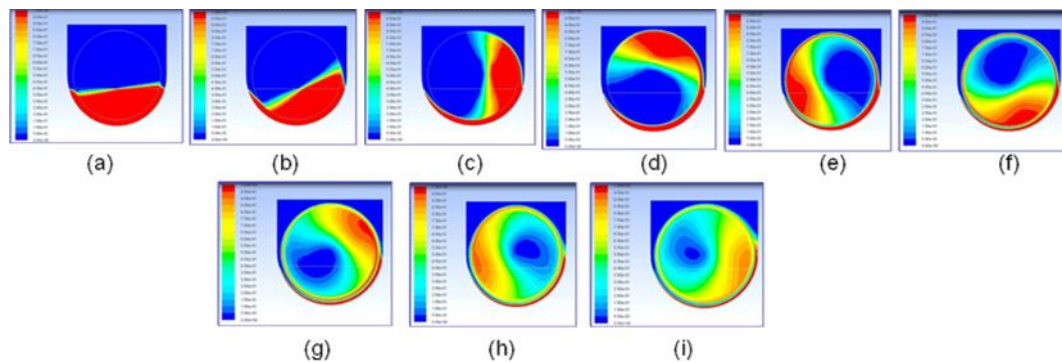
4.1.4.1. Evaluasi *Liquid Film* Tidak Terbentuk Merata di Permukaan Disk, Pada Simulasi CFD

Dari hasil simulasi secara *transient* ini terlihat *liquid film* dapat terangkat sedikit, tetapi tidak membentuk *liquid film* yang merata di permukaan *disk*. Terdapat 2 hal yang diperhitungkan dalam penelitian ini, meliputi, (1) Faktor pemilihan parameter komputasional CFD, (2) Faktor viskositas air yang digunakan dalam model *liquid film*.

A. Faktor Pemilihan Parameter Komputasional

Pemilihan parameter komputasional yang digunakan dalam penelitian ini, mengacu pada beberapa literatur yang sudah dijelaskan dalam Bab 2, dan sudah dikalibrasi yang hasilnya terdapat di Bab 3.

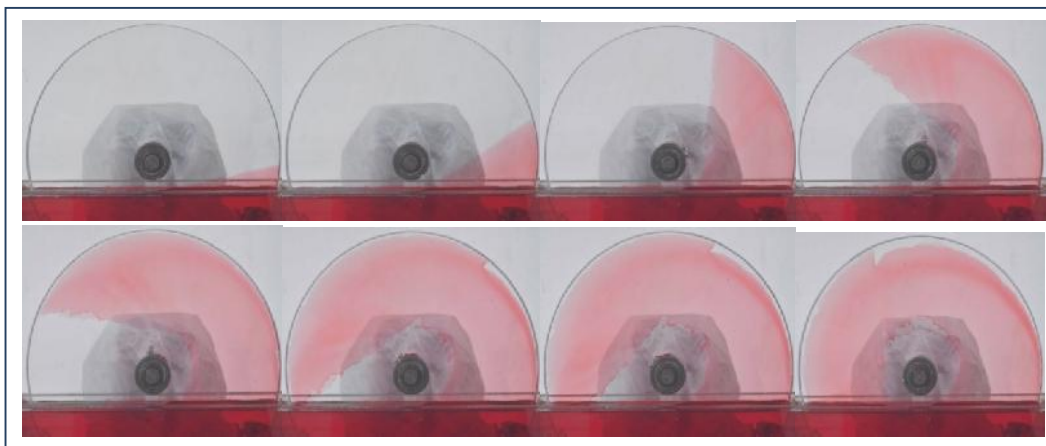
Untuk membuktikan, bahwa parameter komputasional yang digunakan sudah sesuai dengan literatur yang ada (Miah *et al.*, 2016 dan Afanasiev *et al.*, 2008). Dalam penelitian ini, diuji dengan meningkatkan viskositas cairan menjadi 10 kg/m.s. Hasil yang didapatkan, dapat dilihat pada **Gambar 4.26**.



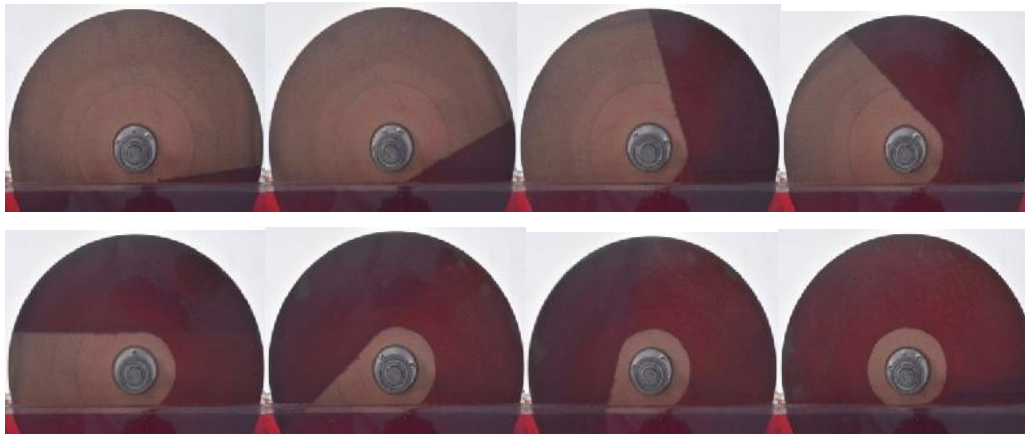
Gambar 4.26. Distribusi *Liquid* ($\mu=10$ kg/m.s) Pada Tampak Depan, Kondisi Transient, Di $H=2.5$ cm, $\omega=20$ rpm, Pada $t=$ (a) 0.1s;(b) 0.495 dt;(c) 1.435 dt;(d) 2.09 dt;(e) 3.15 dt;(f)4.00 dt;(g)5.35 dt;(h) 6.65 t;(i) 7.95 dt.

Dari **Gambar 4.26**, membuktikan bahwa parameter komputasional yang digunakan, mampu menggambarkan *liquid film* yang terikutkan disk saat keluar dari *bulk reactor*. *Liquid* yang digunakan pada **Gambar 4.26**, adalah *high viscous*, sesuai dengan yang digunakan oleh Miah *et al.*, 2016.

Tetapi dari **Gambar 4.26**, visualisasi *liquid film* yang terbentuk ada perbedaan dengan visualisasi *liquid film* hasil eksperimen. Hal ini dijelaskan dalam **Gambar 4.27** visualisasi *liquid film* hasil eksperimen dalam penelitian ini.



(a)



(b)

Gambar 4.27. Distribusi *Liquid Film* ($\mu=0.00086$ kg/m.s) Tampak Depan, Dengan $H=2.5$ cm, $\omega=20$ rpm, Pada Material Bersifat (a) Hidrofobik, material *acrylic*, $K_v=2.152$ nm; (b) Hidrofilik, material *novotex I*, $K_v=95.262$ nm

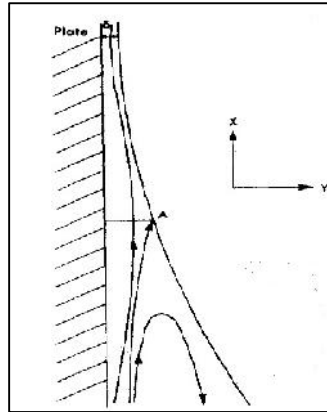
Dari **Gambar 4.26 dan 4.27**, dibandingkan kedua *liquid* dengan viskositas yang berbeda. Pada awal *drag out* pada aliran di model CFD sama dengan hasil eksperimen. Tetapi karena adanya perbedaan viskositas (μ), maka fenomena aliran setelah *drag out* berbeda. Perbedaan yang utama, pada hasil eksperimen dengan *low viscous*, aliran *liquid film* membentuk lingkaran yang tidak dilalui oleh *liquid film*, di dekat poros disk, dengan jari-jari sebesar H . Sedangkan pada model CFD dengan *high viscous*, lubang yang tidak dilalui *liquid film* berubah-ubah posisi dan ukurannya.

Dari penjelasan di atas, membuktikan bahwa parameter operasional yang digunakan dalam pemodelan CFD penelitian ini, sudah sesuai dengan literatur dan mampu membentuk *liquid film* pada viskositas tinggi.

B. Faktor Viskositas Air

Faktor viskositas air yang rendah dalam penelitian ini hipotesanya, merupakan faktor yang berpengaruh terhadap tidak terbentuknya *liquid film* di permukaan disk. Ditinjau dari penelitian yang dilakukan oleh Landau dan Levich (1942), yang meneliti ketebalan *liquid film* dengan menggunakan *tap water* (*low viscous liquid*). Mereka memprediksi tinggi dan potongan dari ketebalan *liquid film* saat keluar dari permukaan air. Dilanjutkan oleh Zeevalkink *et al.*, (1978),

yang mengacu pada teori Landau dan Levich (1942). Menyatakan pola aliran pada saat air mulai tergeret disk keluar dari *bulk reactor* terjadi *stagnation point*. Dijelaskan dalam **Gambar 4.28**, gambaran *stagnation point* di titik A.



Gambar 4.28. Garis Proyeksi Aliran *Liquid Film*, Zeevalkink *et al.*, 1978

Pada area *stagnation point* tidak ada percepatan fluida dan tidak ada gaya inersial pada daerah tersebut. Diatas *stagnation point* terjadi percepatan sampai ketebalan *ultimate film* konstan, nilai inilah yang dihitung sebagai δ . Hal yang terpenting dari *stagnation point* adalah kecepatan dari aliran adalah nol di batas antara cairan dan disk (*boundary*), disebut *no slip*. Hal ini timbul akibat dari viskositas (ρ), yaitu ketahanan aliran *liquid* atau *fluid friction*. Dalam arti menempelnya *liquid* di permukaan solid. Semakin tinggi viskositasnya, semakin mudah *liquid* menempel dan mengalir di atas permukaan solid (Zeevalkink *et al.*, 1978).

Hal ini yang membedakan kondisi kemampuan menempelnya *liquid* yang bersifat *low viscous* (air bersih) dengan *high viscous* (*Newtonian fluid*). Informasi penting yang diperlukan dalam hal ini, yaitu gaya utama yang berpengaruh terhadap aliran yang mengalir, terdiri dari 2 tipe (Anggrahini, 2005):

- a. Gaya yang bekerja pada volume cairan atau massa cairan, yang disebut *body force*
- b. Gaya yang bekerja pada permukaan elemen cairan, yang disebut *surface force*. Gaya permukaan terdiri dari gaya yang bekerja tegak lurus pada permukaan (tekanan) dan gaya yang bekerja tangensial pada permukaan (geseran)

Dalam hal aliran *liquid* yang *low viscous* seperti air, tegangan geser yang bekerja padanya sangat kecil sekali. Dan untuk tegangan permukaannya (σ), besarnya tegangan tersebut sama di semua arah (isotropic)

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = -p$$

Dengan : σ : tegangan permukaan

p : tekanan (Anggrahini, 2005)

Dari sifat dan gaya-gaya yang terjadi di air bersih, agar di *stagnation point* terjadi kondisi *no slip* yang diharapkan, diperlukan kondisi tertentu agar air dapat menempel dengan baik di disk.

Miah *et al.*, 2016, mengatakan terdapat dua faktor dominan yang teridentifikasi dalam pembentukan *liquid film*, yaitu viskositas dan kecepatan putaran. Dalam simulasinya, dilakukan variasi viskositas air, menjadi 3 variasi, yaitu PDMS (*Polydimethylsiloxane*) 1, 2,3, masing-masing di viskositas 1, 5 dan 10 kg/m.s. Untuk membandingkan viskositas yang digunakan dalam penelitian ini, dengan literatur dapat dilihat pada Tabel 4.7, yang menjelaskan parameter komputasional untuk membentuk *liquid film* di permukaan disk.

Tabel 4.7. Parameter Komputasional CFD Untuk Pembentukan *Liquid Film*

No.	Parameter Komputasional	Setting of the computational Parameters				
		Afanasiev <i>et al.</i> , 2008 (FEM)	Miah <i>et al.</i> , 2012 (VOF)	Deng & Dai, 2015 (VOF)	Miah <i>et al.</i> , 2016 (VOF)	This research, 2017 (VOF)
1.	Mesh type	- Triangular - 9533 element & 19522 nodes	- Hexahedral - 369714 element	- Hexahedral - 100000-200000 element	- Hexahedral - 369714 element	- Hexahedral - 246840 elemen & 267364 node
2.	Solver	Steady state	Unsteady	Laminer flow	Unsteady	Unsteady
3.	Rotating Disc Wall	Smooth ($k_s = 0$ & $C_s = 0$)	Smooth ($k_s = 0$ & $C_s = 0$)	Smooth	Smooth	Smooth, topografy surface
4.	Time step	Minimum 10^{-3}	Minimum 10^{-3}	$10^{-5} - 10^{-3}$ s	Minimum 10^{-3} s	10^{-4} s
5.	Physical property of water	Fluid : $\sigma = 72.7 \cdot 10^{-3}$ N/m $\rho = 1000$ kg/m ³ ~ 1 kg/m.s $= 1$ Pa.s $g = 9.81$ m/s ²	PDMS 3 : $\sigma = 0.0211$ N/m $\rho = 975$ kg/m ³ ~ 10 kg/m.s $g = 9.81$ m/s ²	Glyceroll aqueous solution : $\sigma = 0.0727$ N/m $\rho = 1000$ kg/m ³ ~ 1 kg/m.s $g = 9.81$ m/s ²	PDMS : $\sigma = 0.0211$ N/m $\rho = 975$ kg/m ³ $\sim 1,5$ & 10 kg/m.s $g = 9.81$ m/s ²	Tap water : $\sigma = 2.69 \cdot 10^{-3}$ N/m $\rho = 996,81$ kg/m ³ $\sim 0,0008746$ kg/m.s $g = 9.81$ m/s ²

Untuk itu dilakukan prediksi ketebalan *liquid film*, Miah *et al.*, 2016 merumuskan ketebalan *liquid film* dalam dimensionless (h'), sebagai berikut :

$$h' = 2.61 Re^{-0.2} Ca^{0.1} Fr^{0.32} \left(\frac{r}{R}\right)^{0.36} \theta^{-0.16} \dots\dots\dots (4.7)$$

Dengan : $Re = \text{Number of Reynolds} = N_{Re} = \frac{D^2 \omega \rho}{\mu}$

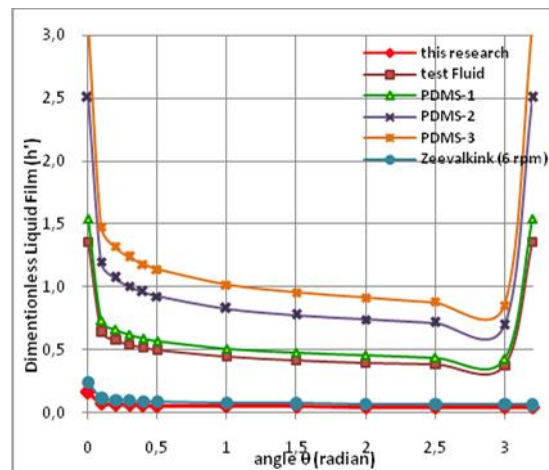
$Ca = \text{Number of Capillary} = Ca = \frac{\omega \mu R}{\sigma}$

$Fr = \text{Number of Froude} = N_{Fr} = \frac{\omega^2 D}{g}$

$(r/R) = R' = \text{Dimensionless jari-jari disk (1-10)}$

$\theta = \text{contact angle}$

Jika viskositas dalam penelitian ini, $\mu = 0,0008746 \text{ kg/m.s}$, dimasukkan pada **Persamaan 4.7**, dan geometri reaktor simulasi yang sama dengan yang digunakan Miah *et al.*, 2016. Maka didapatkan hasil ketebalan *liquid film*, dijelaskan dalam **Gambar 4.29**.



Gambar 4.29. Ketebalan *liquid film* pada variasi viskositas pada posisi radial yang berbeda, pada $w = 3 \text{ rpm}$ (Miah *et al.*, 2016)

Dari **Gambar 4.29**, dapat dilihat gambaran ketebalan *liquid film* viskositas dari penelitian Miah *et al.*, 2016 (*test fluid, PDMS1, PDMS2, PDMS3*), dibandingkan dengan ketebalan *liquid film* dari penelitian ini dan Zeevalkink *et al.*, 1978. Ada perbedaan nilai h' akibat perbedaan viskositas. Di bawah ini dalam **Tabel 4.8** dijelaskan nilai h' tersebut.

Tabel 4.8. Perbedaan Nilai h' Akibat Perbedaan Viskositas

No.	Peneliti	Tipe Liquid dan Viskositas	h' (rata-rata)
1.	Miah <i>et al.</i> , 2016	<i>Test Liquid</i> = 1 kg/m.s.	0.6298
2.		<i>PDMS 1</i> = 1 kg/m.s.	0.7163
3.		<i>PDMS 2</i> = 5 kg/m.s.	1.1609
4.		<i>PDMS 3</i> = 10 kg/m.s.	1.4293
5.	Zeevalkink <i>et al.</i> , 1978	Air bersih, Pada $T=20^\circ\text{C} = 0.001 \text{ kg/m.s}$	0.1003
6.	<i>This research</i> , 2017	Air bersih, Pada $T=26^\circ\text{C} = 0,0008746 \text{ kg/m.s}$	0.0664

Semakin tinggi viskositas yang dimiliki cairan, maka semakin tebal nilai h' atau ketebalan *liquid film*-nya. Dapat jelas terlihat faktor viskositas sangat berpengaruh dalam pembentukan *liquid film* selain faktor kecepatan putaran. Dengan perbedaan nilai h' rata-rata yang relatif besar, antara *liquid* yang digunakan Miah *et al.*, 2016, dibandingkan dengan *liquid* penelitian ini (Rasio 1: 9.5 – 21.5)

Hal ini merupakan alasan mengapa dengan menggunakan *liquid* dari air bersih dalam pemodelan CFD, *liquid film* yang terbentuk tidak merata pada permukaan disk di *aerated zone*. Agar terbentuk *liquid film* yang merata di permukaan disk pada viskositas 0,001 kg/m.s, diperlukan ukuran *mesh* yang jauh lebih kecil dari yang digunakan oleh literatur selama ini. Setidaknya dibutuhkan ukuran *mesh* minimum seperempat dari ketebalan *liquid film* minimum yang diperkirakan (Miah *et al.*, 2016).

Setelah penelitian karakteristik ketebalan *liquid film*, penelitian dilanjutkan meneliti transfer oksigen fisik (K_{La}) di RBC.

4.2. TRANSFER OKSIGEN FISIK DI RBC

Didalam pembahasan mengenai transfer oksigen fisik di RBC, berdasarkan literatur, bahwa ada tiga pendekatan untuk menentukan nilai transfer oksigen di RBC, pendekatan satu lewat *liquid film*, pendekatan dua lewat turbulensi dan pendekatan ketiga melalui *liquid film* dan turbulensi. Alasan inilah mengapa *liquid film* diteliti terlebih dahulu sebelum meneliti transfer oksigen fisik di RBC.

Dalam meneliti transfer oksigen fisik, dilakukan penelitian di *single disk* dan 14 disk, pada *flat* dan *contoured disc*. Pada dasarnya tidak ada dalam literatur yang meneliti K_{La} dengan 1 disk. Tetapi dalam penelitian ini mencoba meneliti untuk mempelajari fenomena kenaikan transfer oksigen. Sedangkan mekanisme sistem yang terjadi di 1 disk dan 14 disk, tidak dibahas dalam penelitian ini. Model empirik yang dibangun nantinya, menggunakan disk berjumlah 14, karena merujuk pada penelitian Mukherji *et al*, 2008.

2.1. Transfer Oksigen Fisik Di Disk Permukaan Datar Berdasarkan Eksperimen

Penelitian transfer oksigen fisik di *flat disc* dalam penelitian ini dianalisa pada single disc dan 14 disk, yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik K_La di masing-masing reaktor dengan perbedaan jumlah disk.

4.2.1.1. NILAI K_La DI REAKTOR DENGAN DISK PERMUKAAN DATAR SEJUMLAH SATU

Menentukan nilai K_La pada *flat disc* dengan *single disc*, bertujuan untuk mengetahui nilai K_La pada satu *flat disc* tanpa pengaruh akumulasi dari disk yang lain. Pada sub bab ini akan dipelajari pengaruh komponen kecepatan disk, dan kekasaran permukaan disk terhadap nilai transfer oksigen (K_La)

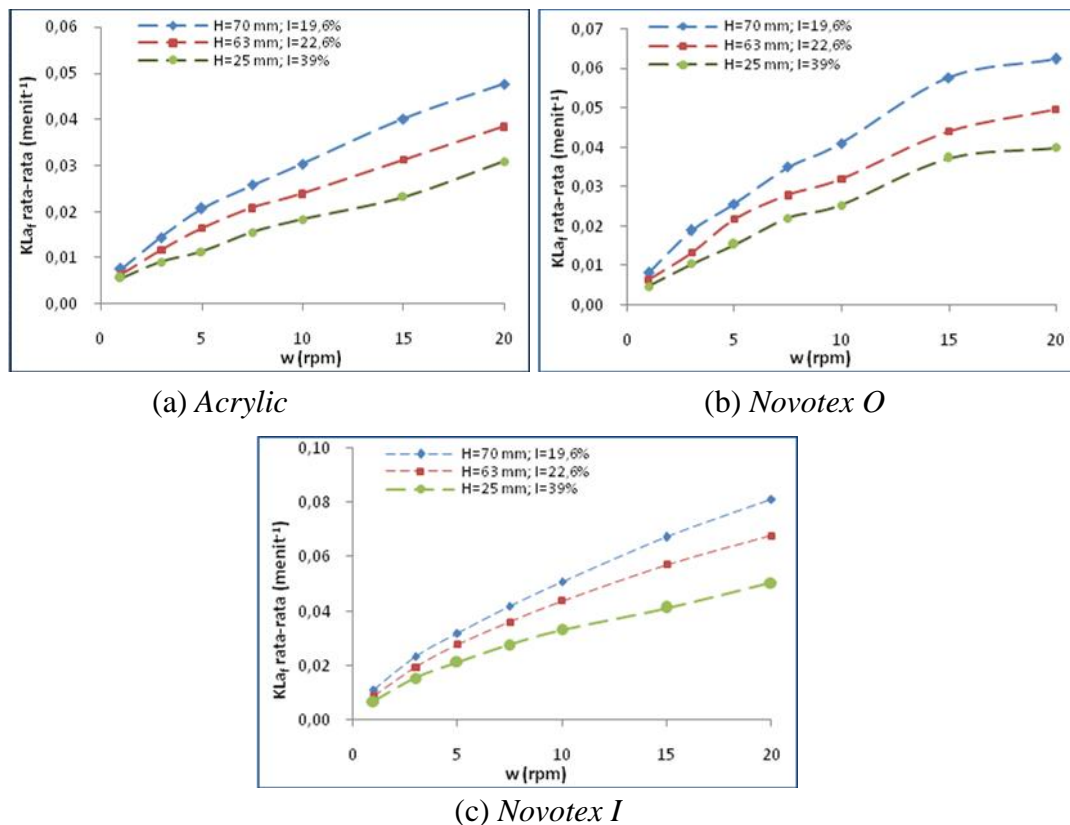
A. Pengaruh Komponen Kecepatan Putaran di *Single Flat Disk* Terhadap Transfer Oksigen Fisik di RBC

Menurut Friedman *et al.*, (1979); Kim dan Molof, (1982); Rittmann *et al.* (1983); Kubsad *et al.*, (2004) dan Chavan & Mukherji, (2008), menyatakan bahwa kecepatan putaran berpengaruh sangat kuat terhadap K_La . Untuk itu, dalam penelitian ini akan dipelajari hubungan transfer oksigen (K_La) dengan komponen kecepatan putaran disk (ωR dan ωR), kekasaran permukaan di disk permukaan datar. Data K_La dijabarkan dalam **Lampiran 9**. Profil nilai K_La_f di reaktor RBC dengan *single flat disc* dijelaskan di **Tabel 4.9**

Tabel 4.9. Nilai K_La_f di *Single Flat Disc* RBC, Pada T=26°C

w (rpm)	K_La_f (menit ⁻¹)								
	Kedalaman 19.6%, H= 0.07			Kedalaman 22.6%, H= 0.063			Kedalaman 39%, H= 0.025		
	<i>Acrylic</i>	<i>Novotex O</i>	<i>Novotex I</i>	<i>Acrylic</i>	<i>Novotex O</i>	<i>Novotex I</i>	<i>Acrylic</i>	<i>Novotex O</i>	<i>Novotex I</i>
1	0,0076	0,0081	0,0109	0,0064	0,0065	0,0087	0,0056	0,0047	0,0067
3	0,0145	0,0189	0,0235	0,0118	0,0133	0,0195	0,0092	0,0104	0,0154
5	0,0207	0,0256	0,0318	0,0164	0,0217	0,0278	0,0114	0,0152	0,0214
7.5	0,0258	0,0350	0,0419	0,0208	0,0278	0,0361	0,0155	0,0220	0,0277
10	0,0304	0,0409	0,0510	0,0239	0,0320	0,0438	0,0183	0,0252	0,0332
15	0,0402	0,0576	0,0673	0,0313	0,0440	0,0572	0,0233	0,0372	0,0412
20	0,0476	0,0624	0,0811	0,0384	0,0497	0,0677	0,0309	0,0399	0,0504

Dari **Tabel 4.9.** terlihat bahwa nilai K_{La_f} bervariasi terhadap perubahan komponen kecepatan disk. akan lebih jelas dilihat pada **Gambar 4.30**



Gambar 4.30. Nilai K_{La_f} (*Single disc*) Pada Kedalaman Disk Yang Berbeda

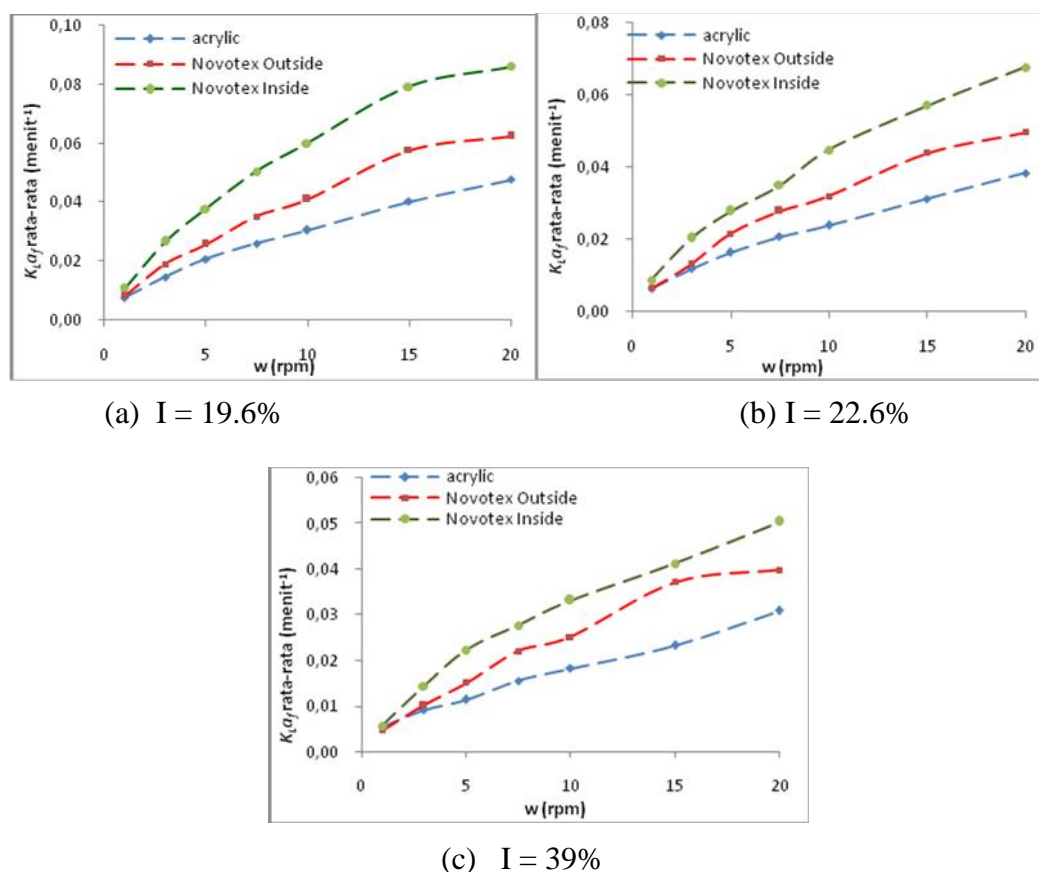
Dari **Gambar 4.30.** ditunjukkan di kecepatan putaran di zona laminar yaitu $\omega=1-7.5$ rpm, nilai K_{La_f} meningkat secara signifikan. Di zona turbulen ($\omega=10-20$ rpm) peningkatan nilai K_{La_f} semakin tajam.

Ditinjau dari variasi kedalaman disk terhadap permukaan air pada ke tiga material, didapatkan profil K_{La} yang terbesar di kedalaman 19.6%, berturut-turut dilanjutkan 22.6% dan terendah 39%. Fenomena ini berlaku pada ke tiga material disk. Yang artinya, di RBC dengan *single disc*, pada kedua material yang bersifat hidrofobik dan hidrofilik, nilai K_{La_f} tertinggi di kedalaman disk 19.6%. Fenomena ini berkebalikan dengan ketebalan *liquid film* dari penelitian sebelumnya, bahwa ketebalan *liquid film* tertinggi di kedalaman disk 39%, berturut-turut 22.6% dan terendah 19.6%.

Setelah dianalisa pengaruh komponen kecepatan terhadap nilai transfer oksigen fisik di RBC, maka dilanjutkan menganalisa pengaruh kekasaran permukaan disk.

B. Pengaruh Kekasaran Permukaan di Disk Permukaan Datar Terhadap Nilai K_{La} di RBC

Untuk material disk dalam penelitian ini, dikelompokkan menjadi 2 kelompok, permukaan hidrofobik yaitu *acrylic* dan *novotex O* dan permukaan hidrofilik *novotex I*. Hasil penelitian yang didapatkan, terdapat perbedaan nilai K_{La} pada kelompok permukaan hidrofilik dengan permukaan hidrofobik, hal ini dijelaskan pada **Gambar 4.31**.



Gambar 4.31. Nilai K_{La} Di Single Flat Disc Pada Material Disk Berbeda.

Dari **Gambar 4.31**, didapatkan bahwa profil nilai K_{La} tertinggi pada material *novotex I* (*hydrophilic surface*), berturut – turut *novotex O* dan *acrylic* (keduanya *hydrofobic surface*). Hal ini berkaitan dengan nilai kekasaran permukaan (K_v). Dengan memvariasi bahan, maka kekasaran permukaan (K_v) tiap

bahanpun berbeda. Dimana dari penelitian tahap 1 didapatkan nilai K_v untuk material *acrylic* terendah, berturut-turut yang lebih tinggi adalah *novotex O* dan tertinggi *novotex I*. Dan di *novotex I* nilai ketebalan *liquid film* dan nilai transfer oksigen tertinggi.

Setelah dianalisa nilai K_{La} di single flat disc, maka pembahasan dilanjutkan dengan reaktor dengan 14 disk, seperti dijelaskan di bawah ini.

4.2.1.2. NILAI K_{La} DI REAKTOR DENGAN 14 DISK PERMUKAAN DATAR

Tahapan selanjutnya dari penelitian ini, adalah menentukan nilai K_{La} pada RBC satu stage terdiri dari 14 *flat disc*. Yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik nilai K_{La} di RBC pada disk yang lebih dari satu dan masih dalam satu *stage*. Akan dibahas terlebih dahulu pengaruh komponen kecepatan terhadap nilai K_{La} di reaktor dengan 14 disk, di bawah ini.

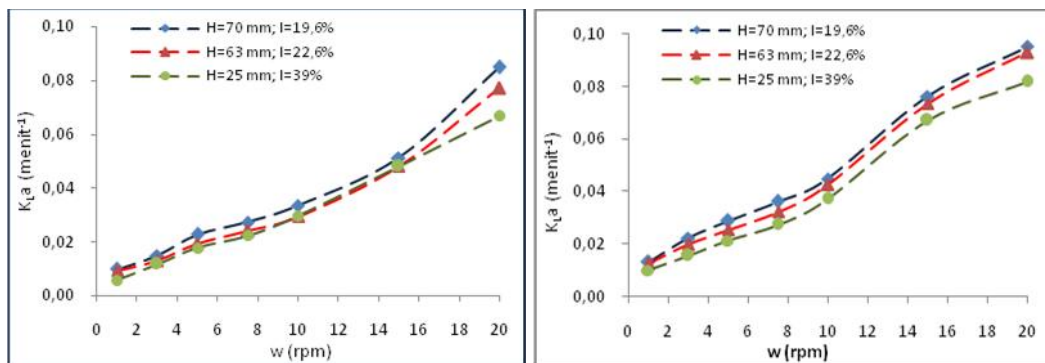
A. Pengaruh Komponen Kecepatan Putaran di 14 Disk Permukaan Datar Terhadap Transfer Oksigen Fisik di RBC

Pada Tabel 4.10 di bawah ini, dikelompokkan berdasar pada tiga material disk, yaitu *acrylic*, *novotex O* dan *novotex I*.

Tabel 4.10. Nilai K_{La_f} Rata-Rata di 14 *Flat Disc* RBC, Pada $T=26^{\circ}\text{C}$

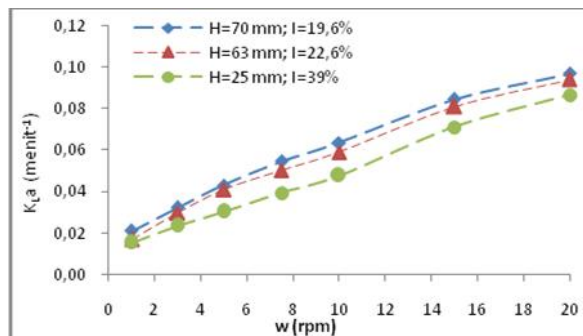
w (rpm)	K_{La_f} (menit ⁻¹)								
	Kedalaman 19.6%, H= 0.07			Kedalaman 22.6%, H= 0.063			Kedalaman 39%, H= 0.025		
	<i>Acrylic</i>	<i>Novotex O</i>	<i>Novotex I</i>	<i>Acrylic</i>	<i>Novotex O</i>	<i>Novotex I</i>	<i>Acrylic</i>	<i>Novotex O</i>	<i>Novotex I</i>
1	0,0096	0,0132	0,0208	0,0092	0,0125	0,0170	0,0066	0,0100	0,0152
3	0,0148	0,0223	0,0321	0,0128	0,0198	0,0297	0,0115	0,0156	0,0234
5	0,0215	0,0288	0,0431	0,0181	0,0254	0,0410	0,0168	0,0212	0,0303
7.5	0,0273	0,0362	0,0547	0,0238	0,0323	0,0503	0,0222	0,0274	0,0394
10	0,0335	0,0447	0,0635	0,0294	0,0424	0,0589	0,0295	0,0371	0,0477
15	0,0512	0,0761	0,0845	0,0481	0,0734	0,0810	0,0479	0,0671	0,0710
20	0,0849	0,0951	0,0970	0,0770	0,0927	0,0940	0,0668	0,0817	0,0866

Dari Tabel 4.10, nilai profil K_{La_f} di RBC, nilai K_{La_f} meningkat dengan meningkatnya nilai kecepatan putaran. Sedangkan berdasarkan kedalaman disk, di kedalaman I = 19.6% & 22.6%, nilai K_{La_f} berhimpitan. Untuk detailnya dapat dilihat pada Gambar 4.32. di bawah ini.



(a) *Acrylic*

(b) *Novotex O*



(c) *Novotex I*

Gambar 4.32. Nilai K_{La_f} Di RBC Dengan 14 Flat Disc Di Kedalaman Berbeda

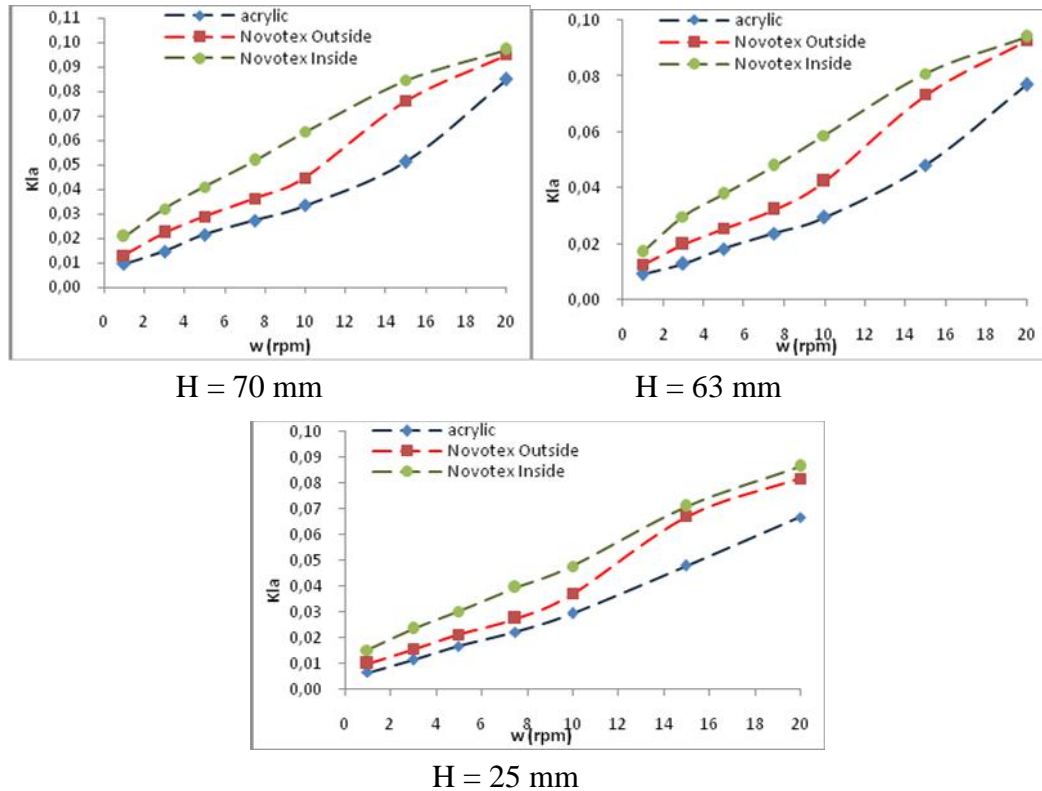
Dari **Gambar 4.32.** didapatkan profil K_{La_f} di RBC 1 Stage- 14 Flat Disc, pada kedalaman yang berbeda. Di kedalaman $H = 70$ mm profil nilai K_{La_f} tertinggi, meskipun selisih nilai K_{La_f} tersebut di ke tiga kedalaman relatif kecil. Hal ini terutama pada kecepatan putaran di zona laminar, yaitu 1-7.5 rpm. Khususnya material *acrylic*, nilai K_{La_f} -nya saling berhimpitan dengan selisih nilainya kecil. Fenomena nilai K_{La_f} pada 14 disk ini, sama dengan pada *single disc*, nilai tertinggi di kedalaman $H = 70$ mm, dan pada zona laminar nilai K_{La_f} di ketiga kedalaman meningkat secara signifikan. Dan di zona turbulen ($\omega = 10$ -20 rpm) peningkatan nilai K_{La_f} semakin tajam.

Untuk selanjutnya, akan dibahas pengaruh kekasaran permukaan terhadap nilai K_{La} di reaktor dengan 14 Disk Permukaan Datar

B. Pengaruh Kekasaran Permukaan di 14 Disk Permukaan Datar Terhadap Transfer Oksigen Fisik di RBC

Tujuan dari sub bab ini, untuk mengetahui, profil nilai K_{La} ditinjau dari kekasaran permukaan atau material disk. Untuk material disk dalam penelitian ini,

dikelompokkan menjadi 2 kelompok, permukaan hidrofobik yaitu *acrylic* dan *novotex O* dan permukaan hidrofilik *novotex I*.



Gambar 4.33. Nilai K_La_f Di RBC 1 Stage- 14 Flat Disc Material Disk Berbeda

Dengan ditinjau pada tiap kedalaman, akan terlihat profil transfer oksigen di tiap material disk yang berbeda, hal ini dijelaskan pada **Gambar 4.33**. Terlihat perbedaan nilai K_La_f dari ketiga material penelitian ini, Pada material *acrylic*, nilai K_La_f yang didapat terkecil dibandingkan kedua material yang lain. Tetapi ada fenomena menarik, di tiga variasi kedalaman nilai K_La_f di zona turbulen ($w=7.5-20$ rpm), nilainya melonjak. Material *novotex I*, ada peningkatan signifikan di setiap peningkatan kecepatan putaran, tetapi peningkatan tersebut, tidak setajam pada material *novotex O* dan *acrylic*, yang bersifat hidrofobik. Dan nilai tertinggi K_La_f masih pada material *novotex I*.

Pembahasan mengenai karakteristik nilai K_La di disk permukaan datar berdasarkan eksperimen sudah selesai dibahas. Untuk itu pembahasan dilanjutkan dengan nilai K_La di disk permukaan berkontur.

4.2.2. Transfer Oksigen Fisik Di Disk Permukaan Berkontur Berdasarkan Eksperimen

Profil nilai K_{La} pada disk permukaan berkontur memiliki fenomena yang berbeda dibandingkan dengan bentuk permukaan datar. Di beberapa literatur, belum ada yang membahas nilai transfer oksigen fisik pada permukaan disk permukaan berkontur. Banyak hal yang membedakan nilai K_{La} di *flat disk* dengan di *contoured disc*. Perbedaan karakteristik tersebut akan diulas dalam sub bab ini, yang diawali dengan mempelajari pengaruh komponen kecepatan dan kekasaran permukaan disk terhadap nilai K_{La} .

Di bawah ini akan dibahas karakteristik nilai K_{La} di *single* dan 14 *contoured disc*.

4.2.2.1. NILAI K_{La} DI REAKTOR PADA SATU DISK PERMUKAAN BERKONTUR




Dalam penelitian ini diuji berbagai bentuk permukaan berkontur dengan luas yang berbeda, bagaimana profil transfer oksigen fisiknya. Yang ditinjau, meliputi pengaruh kompoen kecepatan disk dan kekasaran permukaan terhadap nilai K_{La} di RBC.

A. Pengaruh Komponen Kecepatan Putaran di Disk Permukaan Berkontur Sejumlah Satu Buah, Terhadap Transfer Oksigen Fisik di RBC

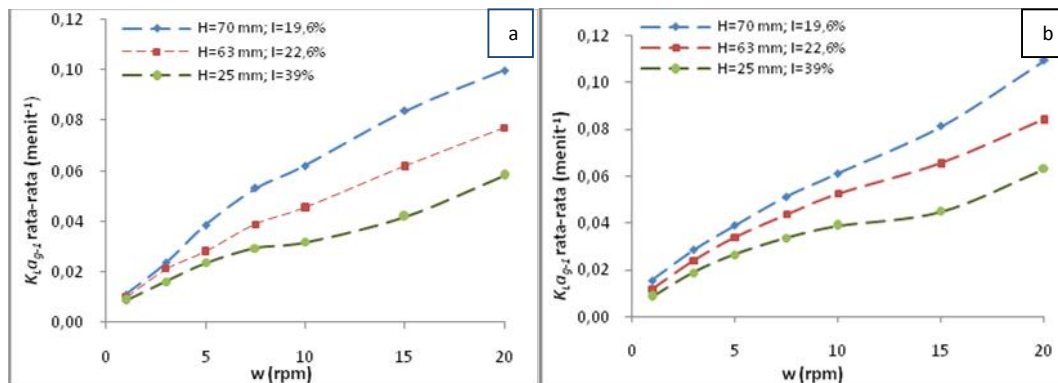
Di *single contoured disc*, dianalisa pula pengaruh komponen kecepatan putaran di disk terhadap transfer oksigen di RBC. Detail hasil rata-rata K_{La} yang dihasilkan dijelaskan pada **Tabel 4.11** di bawah ini.

Dari **Tabel 4.11.** pada kedalaman disk yang berbeda, menghasilkan profil nilai K_{La_g} yang berbeda pula. Dari tabel, didapatkan bahwa nilai K_{La_g} pada disk permukaan berkontur tipe 1 nilainya rata-rata sedikit lebih tinggi daripada disk permukaan berkontur tipe 2. Fenomena ini berlaku di material *novotex O* dan *novotex I*. Perbedaan jumlah dan jarak ‘gunung - lembah’ pada disk permukaan berkontur tipe 1 dan 2, di kecepatan putaran 1-20 rpm, nilai K_{La_g} tidak terlihat perbedaan yang tinggi. Nilai K_{La_g} nya rata-rata hampir berimpitan, meski jika dicermati di disk permukaan berkontur tipe 1 lebih tinggi dibanding tipe 2.

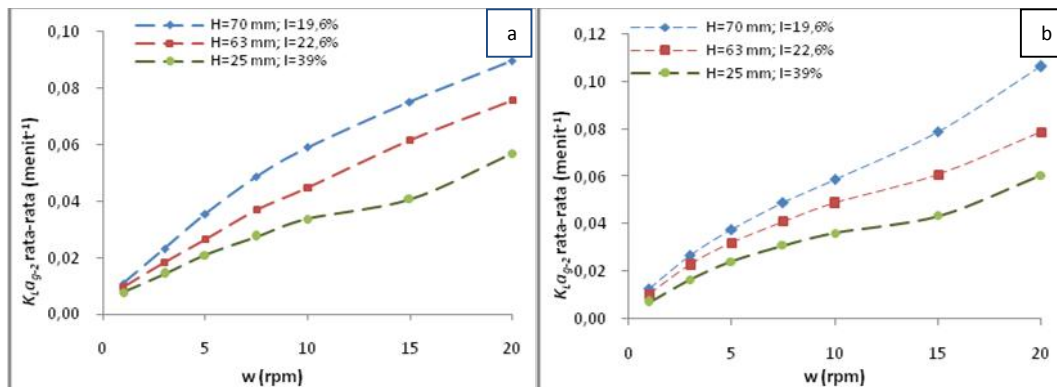
Tabel 4.11. Nilai K_{LaG} Di *Single Disc*, Pada Permukaan Berkontur, Pada $T=26^{\circ}\text{C}$

Type Disk	w (rpm)	K_{La_g} (menit ⁻¹)					
		H= 0.07 m		H= 0.063 m		H= 0.025 m	
		Novotex O	Novotex I	Novotex O	Novotex I	Novotex O	Novotex I
1. Contoured Disc Tipe 1							
	1	0,0109	0,0155	0,0101	0,0117	0,0079	0,0085
	3	0,0235	0,0285	0,0212	0,0239	0,0161	0,0188
	5	0,0365	0,0390	0,0311	0,0340	0,0235	0,0265
	7.5	0,0509	0,0514	0,0393	0,0437	0,0293	0,0336
	10	0,0610	0,0612	0,0456	0,0527	0,0343	0,0388
	15	0,0839	0,0814	0,0620	0,0655	0,0418	0,0450
	20	0,0998	0,1095	0,0771	0,0843	0,0581	0,0632
2. Contoured Disc Tipe 2							
	1	0,0110	0,0127	0,0095	0,0104	0,0078	0,0071
	3	0,0233	0,0270	0,0185	0,0231	0,0143	0,0167
	5	0,0354	0,0378	0,0267	0,0321	0,0210	0,0243
	7.5	0,0487	0,0490	0,0369	0,0411	0,0275	0,0311
	10	0,0591	0,0590	0,0448	0,0491	0,0336	0,0361
	15	0,0752	0,0791	0,0617	0,0608	0,0408	0,0435
	20	0,0897	0,1063	0,0757	0,0787	0,0570	0,0606
3. Contoured Disc Tipe 3							
	1	0,0120	0,0181	0,0104	0,0152	0,0081	0,0106
	3	0,0274	0,0329	0,0232	0,0275	0,0159	0,0197
	5	0,0425	0,0461	0,0343	0,0405	0,0230	0,0277
	7.5	0,0601	0,0591	0,0448	0,0518	0,0288	0,0363
	10	0,0749	0,0719	0,0535	0,0618	0,0363	0,0428
	15	0,0998	0,1069	0,0711	0,0761	0,0552	0,0556
	20	0,1299	0,1354	0,1003	0,1010	0,0740	0,0797

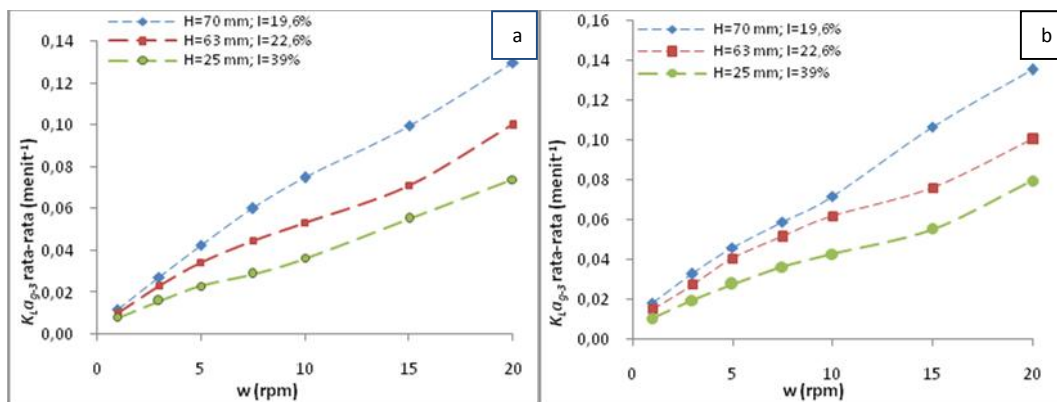
Sedangkan pada disk permukaan berkontur tipe 3, yang ditambah belahan tertentu di disk, terlihat ada perbedaan yang jelas. Terutama di zona turbulensi ($\omega = 10\text{-}20$ rpm) nilai K_{La_g} yang ada meningkat tajam. Akan lebih jelasnya dapat dilihat dalam **Gambar 4.34.** penggambaran nilai K_{La_g} ditinjau dari kedalaman disk



Disk Permukaan Berkontur Tipe 1



Disk Permukaan Berkontur Tipe 2



Disk Permukaan Berkontur Tipe 3

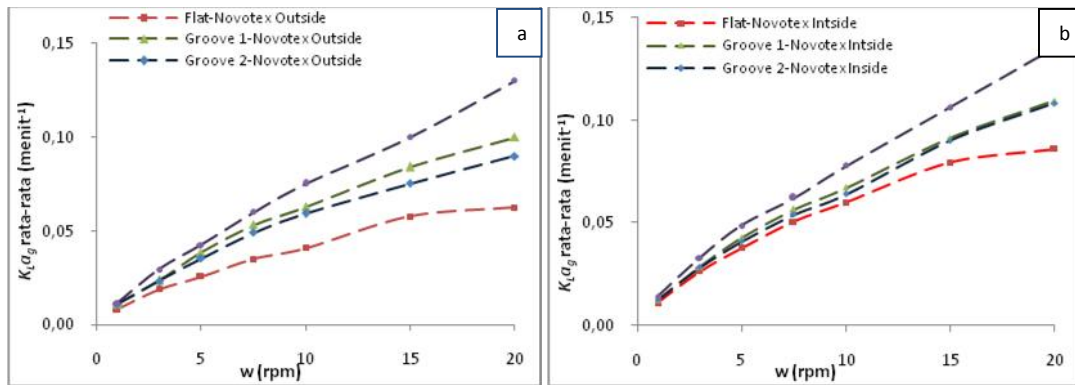
Gambar 4.34. Nilai K_{La_g} (rata-rata) di *Single Contoured Disc*, Material (a) *Novotex O*; (b) *Novotex I*

Di tiga tipe disk permukaan berkontur, didapatkan bahwa pada kedalaman $H = 70 \text{ mm}$ nilai K_{La_g} tertinggi, diikuti berturut-turut $H=63 \text{ mm}$ dan $H=25 \text{ mm}$. Fenomena yang sama dengan di disk permukaan datar.

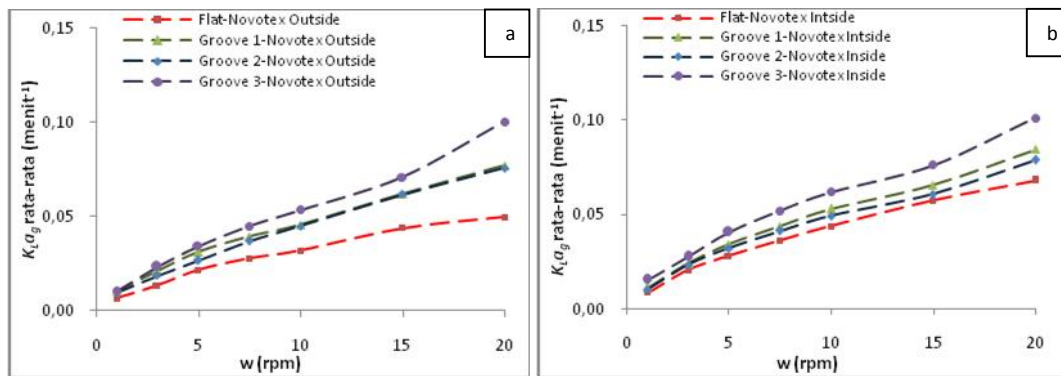
Setelah pembahasan mengenai pengaruh komponen kecepatan disk terhadap nilai K_{La} , maka pembahasan dilanjutkan pengaruh kekasaran permukaan.

B. Pengaruh Kekasaran Permukaan di Satu Disk Permukaan Berkontur Terhadap Transfer Oksigen Fisik di RBC

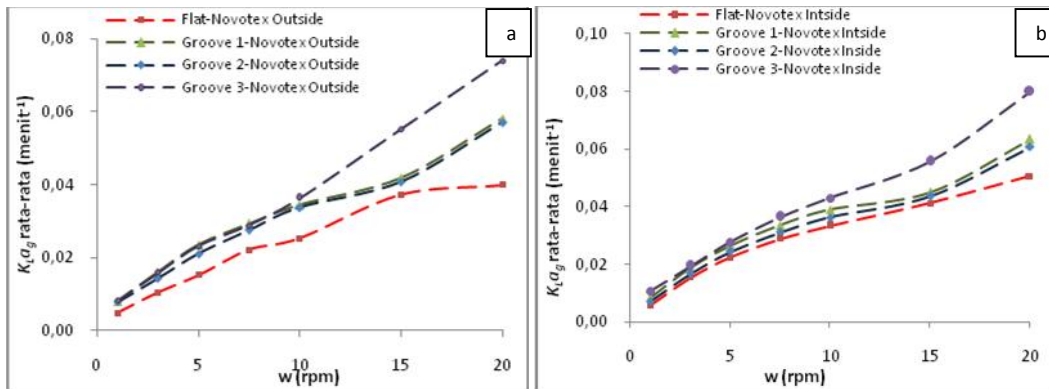
Tujuan dari sub bab ini, untuk mengetahui, profil nilai K_{La} yang ditinjau dari kekasaran permukaan atau material disk. Lebih jelasnya dapat dilihat pada **Gambar 4.35.** di bawah ini.



Kedalaman Disk 19.6 %



Kedalaman Disk 22.6 %



Kedalaman Disk 39 %

Gambar 4.35. Nilai K_{La_g} dan K_{La_f} (rata-rata), di *single contoured disc* pada material (a) *Novotex O*; (b) *Novotex I*

Dari **Gambar 4.35**, didapatkan terdapat perbedaan nilai K_{La_g} pada kelompok permukaan hidrofilik dengan permukaan hidrofobik pada ke tiga tipe disk permukaan berkontur. Di disk permukaan berkontur pada material hidrofilik, nilai K_{La_g} lebih tinggi dibandingkan material hidrofobik.

Jika nilai K_{La_g} dibandingkan dengan K_{La_f} , maka dari hasil penelitian didapatkan nilai K_{La_g} relatif lebih tinggi. Prosentase kenaikan nilai K_{La} dari disk permukaan datar ke disk permukaan berkontur, dari **Lampiran 11**. Kenaikan tersebut merata di seluruh kecepatan putaran dan kedalaman disk. Dibawah ini prosentase kenaikannya secara garis besar berdasarkan nilai prosentase minimum dan maksimum data.

- Novotex O* di - disk permukaan berkontur tipe 1 : 14.34% - 82.98%
 - disk permukaan berkontur tipe 2 : 9.68% - 76.60%
 - disk permukaan berkontur tipe 3 : 30.91% - 117.91%
Novotex I di - disk permukaan berkontur tipe 1 : 6.90% - 66.70%
 - disk permukaan berkontur tipe 2 : 2.18% - 25.78%
 - disk permukaan berkontur tipe 3 : 22.89% - 25.96%

Disk permukaan berkontur tipe 3 kenaikan nilai K_{La} -nya tertinggi dibandingkan kedua tipe lainnya. Ini membuktikan bahwa dengan mengatur kekasaran permukaan dengan kekasaran dan pola kontur tertentu akan meningkatkan luas permukaan disk dan secara langsung meningkatkan nilai transfer oksigen di RBC.

Pembahasan mengenai karakteristik nilai K_{La} di *single contoured disc* berdasarkan eksperimen sudah selesai. Maka dibawah ini dilanjutkan dengan pembahasan di reaktor dengan *contoured disc* sejumlah 14 buah. Alasan pemilihan 14 buah, mengacu pada reaktor di penelitian Mukherji *et al.*, 2008. Dimana dengan geometri RBC yang 14 buah disk, didapatkan nilai K_{La} tertinggi.




4.2.2.2. NILAI K_{La} DI REAKTOR DENGAN 14 DISK PERMUKAAN BERKONTUR

Pada sub bab ini akan dianalisa profil nilai K_{La} pada 14 *contoured disc*, untuk mengetahui profil nilai K_{La} pada disk dengan bentuk permukaan berkontur, dengan kekasaran permukaan atau jenis material yang menjadi fokus perhatian.

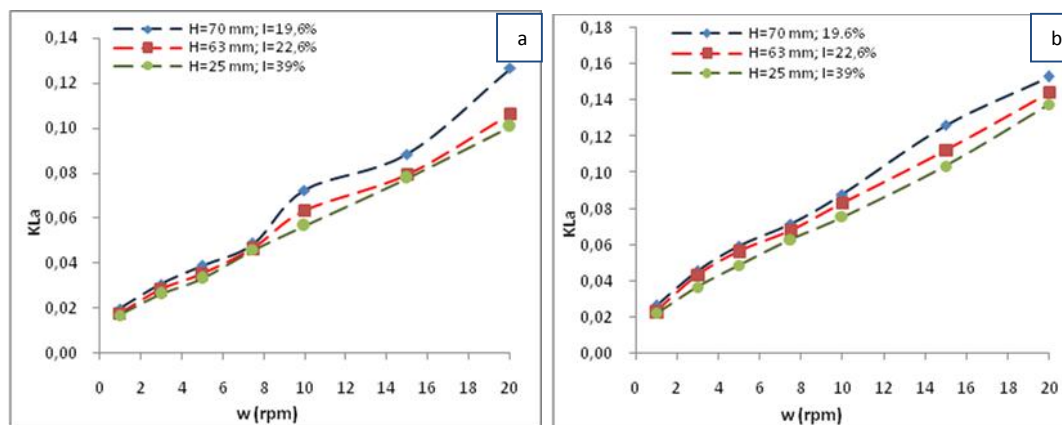
A. Pengaruh Komponen Kecepatan Putaran di 14 Disk Permukaan Berkontur Terhadap Transfer Oksigen Fisik di RBC

Ditinjau dari kedalaman disk yang berbeda, profil nilai K_{La_g} pada reaktor RBC satu stage dengan 14 *contoured disc* dapat dilihat pada **Tabel 4.12**.

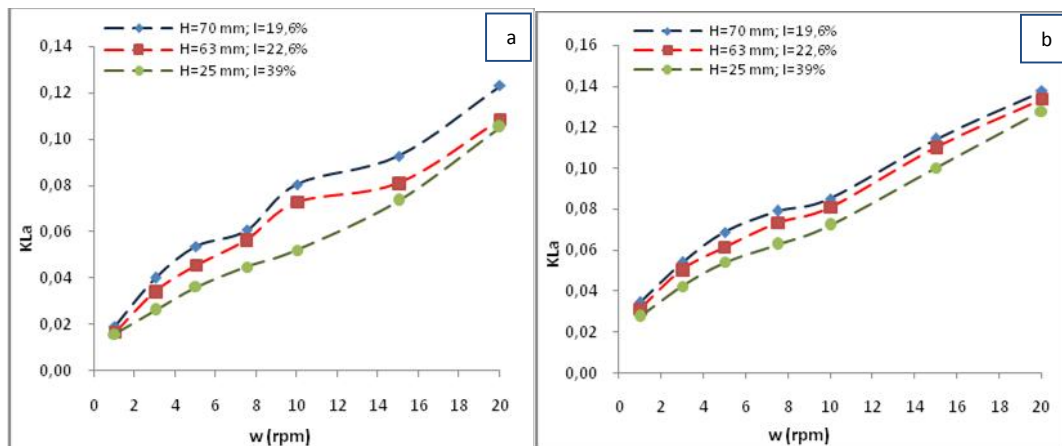
Tabel 4.12. Nilai K_La_g Pada RBC Dengan 14 Disk Permukaan Berkontur

Tipe Disk	w (rpm)	K_La_g (menit ⁻¹)					
		H= 0.07 m		H= 0.063 m		H= 0.025 m	
		Novotex O	Novotex I	Novotex O	Novotex I	Novotex O	Novotex I
1.. Contoured Disc Tipe 1 	1	0,0198	0,0263	0,0177	0,0231	0,0170	0,0222
	3	0,0308	0,0457	0,0284	0,0434	0,0264	0,0366
	5	0,0411	0,0594	0,0379	0,0566	0,0332	0,0487
	7.5	0,0527	0,0716	0,0496	0,0679	0,0456	0,0629
	10	0,0693	0,0878	0,0635	0,0833	0,0567	0,0756
	15	0,0884	0,1262	0,0797	0,1124	0,0778	0,1037
	20	0,1265	0,1529	0,1065	0,1445	0,1006	0,1377
2. Contoured Disc Tipe 2 	1	0,0194	0,0342	0,0167	0,0309	0,0159	0,0274
	3	0,0400	0,0538	0,0342	0,0503	0,0262	0,0421
	5	0,0536	0,0687	0,0456	0,0615	0,0363	0,0539
	7.5	0,0608	0,0789	0,0565	0,0733	0,0449	0,0626
	10	0,0805	0,0850	0,0728	0,0810	0,0522	0,0720
	15	0,0927	0,1142	0,0810	0,1102	0,0735	0,1001
	20	0,1230	0,1377	0,1084	0,1337	0,1051	0,1279
3. Contoured Disc Tipe 3 	1	0,0280	0,0366	0,0260	0,0332	0,0177	0,0303
	3	0,0439	0,0584	0,0392	0,0533	0,0318	0,0491
	5	0,0551	0,0768	0,0474	0,0691	0,0411	0,0623
	7.5	0,0673	0,0924	0,0591	0,0847	0,0521	0,0765
	10	0,0943	0,1068	0,0845	0,0979	0,0637	0,0878
	15	0,1174	0,1418	0,1153	0,1342	0,0990	0,1265
	20	0,1538	0,1884	0,1490	0,1783	0,1221	0,1560

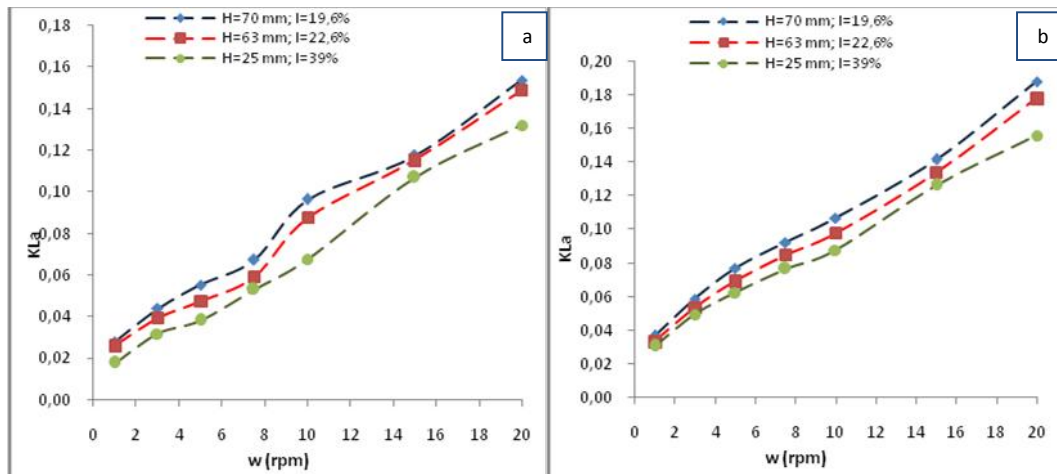
Pada **Tabel 4.12**, dikelompokkan berdasar pada dua material disk, yaitu *novotex O* dan *novotex I*. Dimana kedua material memiliki sifat masing-masing terhadap kontak dengan *liquid film*. Material *novotex O* bersifat *hydrofobic surface*, sedangkan *novotex I* bersifat *hydrophilic surface*. Nilai profil K_La_g di RBC dengan 14 *contoured disc*, nilai K_La_g meningkat dengan meningkatnya nilai kecepatan putaran. Untuk detailnya dapat dilihat pada **Gambar 4.36**.



Disk Permukaan Berkontur Tipe 1



Disk Permukaan Berkontur Tipe 2



Disk Permukaan Berkontur Tipe 3

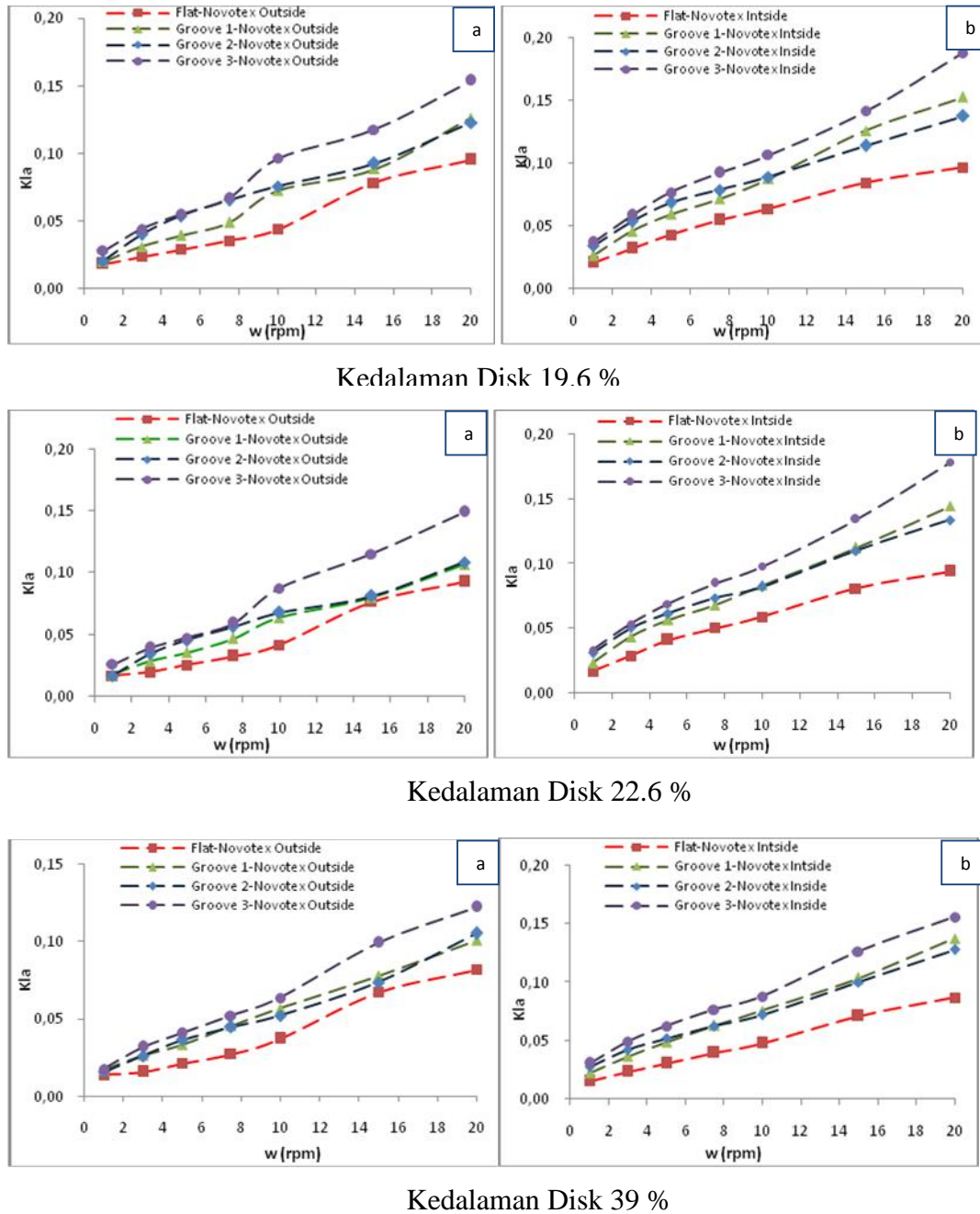
Gambar 4.36. $K_L a_g$ RBC Dengan 14 Disk Permukaan Berkontur Di Material, (a) *Novotex O*; (b) *Novotex I*

Pada **Gambar 4.36**, nilai $K_L a_g$ di kedalaman $H=70$ mm didapatkan nilai tertinggi, dibandingkan 2 kedalaman disk lainnya. Hal ini sama dengan nilai $K_L a_f$ di *flat disc*. Nilai $K_L a_g$ di tiga tipe *contoured disc*, antar variasi kedalaman disknya selisih nilainya berdekatan, hal ini berbeda dengan *flat disc*. Di tiga tipe *contoured disc*, nilai $K_L a_g$ *novotex I* konsisten lebih tinggi dibandingkan dengan *novotex O*. Di material *novotex O* pada tiga tipe *contoured disc*, nilai $K_L a_g$ di kecepatan putaran lebih dari 7.5 rpm, nilainya meningkat dengan tajam.

Setelah pembahasan mengenai pengaruh komponen kecepatan disk terhadap nilai $K_L a$, maka pembahasan dilanjutkan dengan mempelajari pengaruh kekasaran permukaan terhadap nilai $K_L a$ di 14 *contoured disc*.

B. Pengaruh Kekasaran Permukaan di 14 Disk Permukaan Berkontur Terhadap Transfer Oksigen Fisik di RBC

Tujuan dari sub bab ini, untuk mengetahui, profil nilai K_{La_g} ditinjau dari kekasaran permukaan dan tipe kontur pada kedalaman yang berbeda. dijelaskan pada **Gambar 4.37**.



Gambar 4.37. Nilai K_{La_g} Di RBC Dengan 14 Disc Pada Kedalaman Yang Berbeda, (a) Novotex O; (b) Novotex I

Pada **Gambar 4.37**, ditinjau dari tiap kedalaman disk, profil nilai K_{La_g} di *contoured disc* tipe 3 tertinggi. Hal ini berkaitan dengan bentuk permukaan tipe 3, yang luas permukaannya lebih besar dibandingkan dengan tipe 1 dan 2. Dengan penambahan kontur secara vertikal di *contour radial*, sehingga mampu meningkatkan nilai K_{La_g} .

Sedangkan *contoured disc* tipe 2, rata-rata pada kecepatan putaran di bawah 10 rpm, lebih besar dari tipe 1. Fenomena ini berlaku pada kedua jenis material, yaitu di *novotex O* dan *novotex I*. Hal ini berkaitan dengan bentuk permukaan disk tipe 2, dengan lebar ‘jurang’ lebih besar daripada lebar ‘gerigi’. Sehingga di kecepatan putaran rendah < 10 rpm, lebih efektif meningkatkan nilai K_{La_g} dibandingkan tipe 1.

Nilai K_{La_g} di ketiga *contoured disc*, lebih besar dibandingkan *flat disc*. Hal ini membuktikan bahwa dengan meningkatkan luas permukaan disk, maka nilai K_{La} menjadi meningkat.

Jika nilai K_{La_g} dibandingkan dengan K_{La_f} , maka dari hasil penelitian didapatkan nilai K_{La_g} relatif lebih tinggi. Prosentase kenaikan nilai K_{La} dari disk permukaan datar ke disk permukaan berkontur, didapatkan ada kenaikan nilai K_{La} . Kenaikan tersebut merata di seluruh kecepatan putaran dan kedalaman disk. Dibawah ini prosentase kenaikannya secara garis besar berdasarkan nilai prosentase minimum dan maksimum data.

- Novotex O* di - disk permukaan berkontur tipe 1 : 3.13% - 69.23%
- disk permukaan berkontur tipe 2 : 1.21% - 79.53%
- disk permukaan berkontur tipe 3 : 45.83% - 103.85%
- Novotex I* di - disk permukaan berkontur tipe 1 : 26.44% - 64.03%
- disk permukaan berkontur tipe 2 : 36.05% - 80.26%
- disk permukaan berkontur tipe 3 : 65.68% - 105.61%

Disk permukaan berkontur tipe 3 kenaikan nilai K_{La} -nya tertinggi dibandingkan kedua tipe lainnya.

Di beberapa literatur, untuk meningkatkan nilai K_{La} , dengan memperbesar diameter disk (Bintanja *et al.*, 1975; Zeevalkink *et al.*, 1978; Gupta, 2007; Mukherji *et al.*, 2008), Sedangkan dalam penelitian ini, untuk memperluas permukaan disk, tidak dengan memperbesar diameter disk, tetapi membentuk

kontur pada permukaan disk, sehingga diharapkan lebih efektif untuk operasional RBC.

Pembahasan mengenai pengaruh komponen kecepatan dan kekasaran permukaan disk terhadap nilai K_{La} di disk permukaan datar maupun berkontur, di reaktor *single* dan 14 disk sudah selesai. Analisa dilanjutkan dengan uji statistik hubungan nilai K_{La} terhadap komponen kecepatan disk dan kekasaran permukaan.

4.2.3. Uji Statistik Komponen Kecepatan Putaran dan Kekasaran Permukaan Terhadap Nilai Transfer Oksigen Di RBC

Dalam penelitian ini dipilih uji statistik *unbalanced* desain faktorial. Karena secara bersamaan akan diamati pengaruh beberapa faktor terhadap nilai K_{La} . Digunakan desain faktorial yang memungkinkan melakukan kombinasi antar level faktor. Di bawah ini dibahas terlebih dahulu uji untuk reaktor 1, dengan disk sejumlah satu, baik di *flat* maupun *contoured disc*.

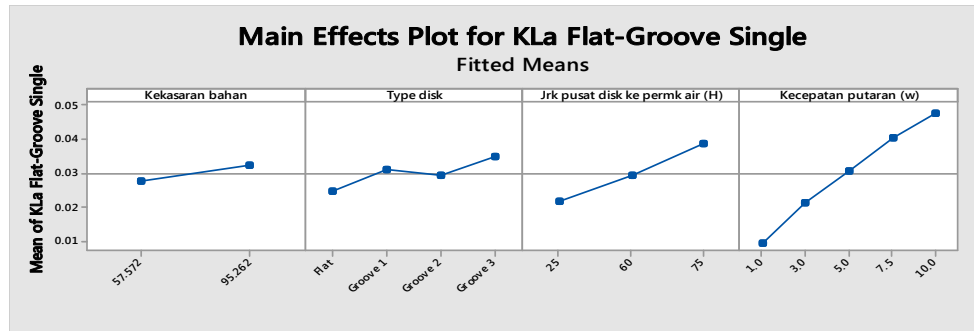
4.2.3.1 SATU DISK PERMUKAAN DATAR DAN BERKONTUR DI RBC

Untuk disk permukaan datar, ada 3 faktor dalam penelitian ini secara eksperimen, yang dianggap mempengaruhi nilai K_{La} . Ketiga faktor tersebut meliputi: kekasaran permukaan material disk, komponen kecepatan (kecepatan putaran dan kedalaman disk). Untuk disk permukaan berkontur, ada 4 faktor yang meliputi: kekasaran permukaan material disk, komponen kecepatan (kecepatan putaran dan kedalaman disk) dan tipe bentuk permukaan disk. Sedangkan level yang digunakan dalam penelitian ini, dijelaskan pada **Tabel 4.13**.

Tabel 4.13. Desain faktorial untuk desain K_{La} di *Single Flat & Contoured Disc*

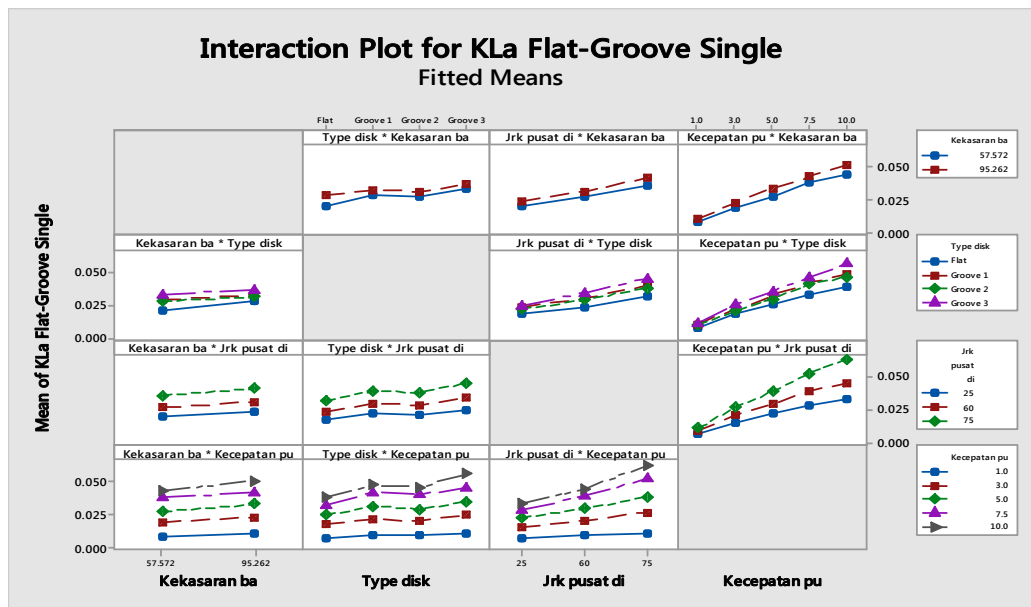
No.	Faktor	Level	Nilai
1.	Kekasaran permukaan material disk (Kg) (nm)	3	2.152, 57.572, 95.262
2.	Jarak pusat disk terhadap permukaan air (H) (mm)	3	25, 63, 70
3.	Kecepatan putaran (w) (rpm)	7	1.0, 3.0, 5.0, 7.5, 10.0
4.	Tipe bentuk permukaan disk	4	<i>Flat disc, contoured disc type 1, 2 & 3</i>

Detail hasil uji faktorial untuk disk permukaan datar dan berkonturterdapat dalam **Lampiran 8**. Hasil uji F dan p, hasil out put ANOVA, didapatkan bahwa faktor dalam **Tabel 4.13**. berpengaruh pada nilai K_{La} . Selanjutnya dilakukan uji pengaruh utama dari masing-masing variabel terhadap nilai K_{La} . dijelaskan di **Gambar 4.38**.



Gambar 4.38. Faktor Utama Yang Berpengaruh Terhadap K_{La} di *Single Flat – Contoured Disc RBC*

Dari **Gambar 4.38**. memperlihatkan bahwa kekasaran permukaan disk, kedalaman, tipe dan kecepatan putaran disk memiliki pengaruh terhadap nilai K_{La} . Keempat jenis faktor memiliki pengaruh yang searah. Sedangkan interaksi antar faktor dijelaskan dalam **Gambar 4.39**.



Gambar 4.39. Interaksi Antar Faktor Terhadap K_{La} di *Single Flat Disc*

Dari **Gambar 4.39**. analisis plot interaksi antara kekasaran permukaan disk, kedalaman, tipe dan kecepatan putaran disk. Didapatkan bahwa interaksi faktor yang cukup berpengaruh agar nilai K_{La} optimal meningkat di *single flat and contoured disc* RBC, adalah interaksi antara kekasaran permukaan material *novotex O* dan *novotex I*, di jarak pusat disk terhadap permukaan air 25 - 70 cm untuk disk berkontur, dan di kecepatan putaran 3 – 10 rpm. Kedalaman disk di *flat single disc* untuk bisa meningkatkan nilai K_{La} hanya pada kedalaman 63-70 cm, di *contoured single disc* kedalaman disk bisa lebih dalam sampai H=25 cm, sehingga reaktor RBC dalam lebih banyak menampung limbah untuk diolah. Dan *contoured single disc* di tiga tipe, mampu meningkatkan nilai K_{La} di kecepatan terendah 3 rpm, sehingga lebih bisa menghemat daya.

Dan jika ditinjau yang terbaik dari tipe permukaan disk, kedalaman, kecepatan disk dan kekasaran permukaannya, pada *single disc* RBC. Dan yang mampu meningkatkan nilai K_{La} tertinggi adalah tipe 3, di kedalaman disk 70 cm, di kecepatan putaran 10 rpm dan di material jenis hidrofilik (*novotex I*).

Setelah uji statistik di reaktor 1, dengan disk sejumlah 1 buah di flat dan contoured disc, uji statistik dilanjutkan pada reaktor 2, dengan disk sejumlah 14 buah. Pembahasan lengkap dijelaskan di bawah ini.

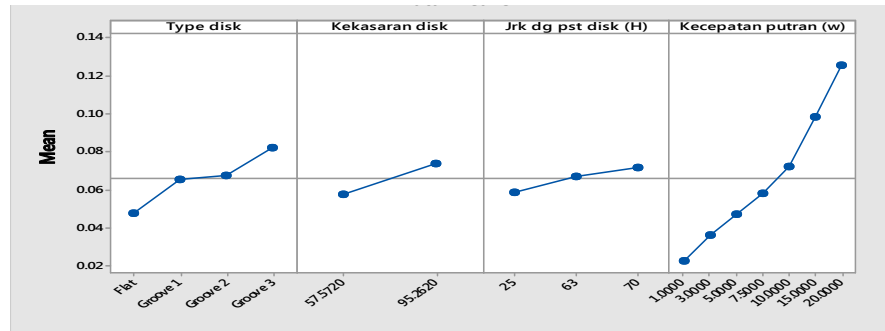
4.2.3.2 EMPAT BELAS DISK PERMUKAAN DATAR DAN BERKONTUR DI RBC

Untuk disk permukaan berkontur, ada 4 faktor dalam penelitian ini yang dianggap mempengaruhi nilai K_{La} . Keempat faktor tersebut meliputi: kekasaran permukaan material disk, komponen kecepatan (kecepatan putaran dan kedalaman disk) dan tipe bentuk permukaan disk. Sedangkan level yang digunakan dalam penelitian ini, dijelaskan dalam **Tabel 4.14**.

Tabel 4.14. Desain faktorial untuk desain K_{La} di *14Flat & Contoured Disc*

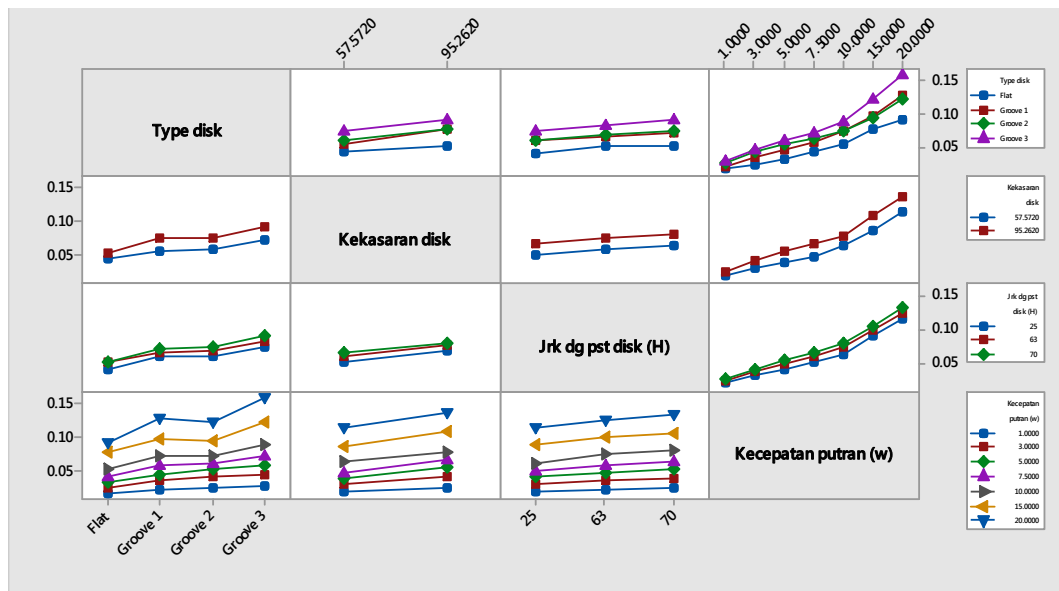
No.	Faktor	Level	Nilai
1.	Kekasaran permukaan material disk (Kg) (nm)	3	2.152, 57.572, 95.262
2.	Jarak pusat disk terhadap permukaan air (H) (mm)	3	25, 63, 70
3.	Kecepatan putaran (w) (rpm)	7	1.0, 3.0, 5.0, 7.5, 10.0
4.	Tipe bentuk permukaan disk	4	<i>Flat disc, contoured disc type 1, 2 & 3</i>

Hasil uji F dan p, hasil out put ANOVA, didapatkan bahwa faktor dalam **Tabel 4.14.** berpengaruh pada nilai K_{La} . Selanjutnya dilakukan uji pengaruh utama dari masing-masing variabel terhadap nilai K_{La} . dijelaskan di **Gambar 4.40.**



Gambar 4.40. Faktor Utama Yang Berpengaruh Terhadap K_{La} 14 disk,

Dari **Gambar 4.40.** memperlihatkan bahwa kekasaran permukaan disk, kedalaman, tipe dan kecepatan putaran disk memiliki pengaruh terhadap nilai K_{La} . Keempat jenis faktor memiliki pengaruh yang searah. Kedalaman yang optimal di $H = 7$ cm, kekasaran permukaan tertinggi di $K_v = 95.2620$ nm, dan di kecepatan putaran dimulai dari 10 rpm, nilai K_{La} meningkat tajam. Untuk uji interaksi antar faktor, secara detail dijelaskan dalam **Gambar 4.41.**



Gambar 4.41. Interaksi Antar Faktor Terhadap K_{La} di 14 Flat Disc

Dari **Gambar 4.41** didapatkan bahwa interaksi faktor yang berpengaruh agar nilai K_{La} optimal meningkat di RBC, adalah interaksi antara kekasaran permukaan material *novotex O* dan *novotex I*, di jarak pusat disk terhadap permukaan air 25 - 70 cm untuk disk berkontur, dan di kecepatan putaran 3 – 10 rpm. Kedalaman disk di *flat disc* untuk bisa meningkatkan nilai K_{La} hanya pada kedalaman 63-70 cm, di *contoured disc* kedalaman disk bisa lebih dalam sampai H=25 cm, sehingga reaktor RBC dapat lebih banyak menampung limbah untuk diolah. Dan *contoured* di tiga tipe, mampu meningkatkan nilai K_{La} di kecepatan terendah 3 rpm, sehingga lebih bisa menghemat daya.

Pembahasan mengenai uji statistik pengaruh komponen kecepatan dan kekasaran permukaan terhadap nilai K_{La} , sudah selesai. Pembahasan akan dilanjutkan dengan membangun model empirik untuk mengestimasi transfer oksigen di RBC.

4.2.4. Model Empirik Analisis Dimensi Untuk Nilai Transfer Oksigen Fisik di RBC

Setelah didapatkan dari hasil eksperimental bahwa ada pengaruh kekasaran permukaan (K_{vg}) dan komponen kecepatan disk (ω , R dan H) terhadap nilai transfer oksigen fisik (K_{La}) di RBC. Maka perlunya dilakukan analisis lanjutan, untuk mengetahui bagaimana hubungan dari variabel independen di atas terhadap transfer oksigen fisik (K_{La}) di RBC. Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini, menggunakan model empirik Analisis dimensional metoda Buckingham- π . Di bawah ini, digunakan model empirik Analisis Dimensi untuk transfer oksigen fisik (K_{La}) di *flat* dan *contoured disc*.

4.2.4.1. ANALISIS DIMENSI TRANSFER OKSIGEN FISIK, DISK PERMUKAAN DATAR DI RBC

Parameter terpenting yang berpengaruh terhadap K_{La} di bak reaktor RBC adalah kecepatan putaran disk (ω). Hubungan yang kuat antara K_{La} dan ω , sudah dijelaskan secara luas (Zeevalkink *et al.*, 1979; Rittmann *et al.*, 1983; Kim dan Molof, 1982; Kubsad *et al.*, 2005; Mukherji *et al.*, 2008). Tetapi peningkatan kecepatan putaran sebesar-besarnya untuk meningkatkan transfer oksigen tidak dibutuhkan dalam aplikasi RBC untuk pengolahan limbah secara biologis.

Jika kecepatan putaran melebihi limit tertentu, akan menyebabkan luruhnya *biofilm* dari disk, dan menyebabkan tidak efektifnya sistem pengolahan tersebut. Untuk itu untuk memodelkan K_La ini, kecepatan putaran yang digunakan 1 - 10 rpm, kecepatan optimal untuk habitat *biofilm* di disk. Dengan kecepatan putaran yang terbatas pada kecepatan rendah tersebut, diperlukan inovasi untuk meningkatkan nilai K_La . Upaya yang diperlukan, dengan menggabungkan desain alat RBC dan penentuan parameter geometris, menjadi faktor penting untuk memodelkan nilai K_La .

Pada parameter K_La_t , variabel yang berpengaruh pada transfer oksigen akibat turbulensi sudah diidentifikasi dari literatur. Variabel tersebut meliputi : diameter disk (D), jari-jari disk (R), luas disk (A_d), kecepatan putaran (ω), *interfacial area* bak reaktor (A_t), kedalaman disk (H), viskositas (μ) dan densitas (ρ) air. (Mukherji *et al.*, 2008; Rittman *et al.*, 1983; Boumansur *et al.*, 1985; Zeevalkink *et al.*, 1978).

Sedangkan pada K_La_d , variabel yang berpengaruh pada transfer oksigen melalui *liquid film* yang menempel disk terekpose di udara, dijelaskan oleh Rittmann *et al.*, 1983. Meliputi, viskositas (μ) dan densitas (ρ) air, ketebalan *liquid film* (δ), Luas disk basah (A_w).

Dari hasil evaluasi variabel-variabel yang berpengaruh terhadap K_La_t dan K_La_d dari literatur, dalam model ini ditambahkan variabel nilai kekasaran permukaan (K_v). Didapatkan pula nilai luas disk basah (A_w) pada penelitian ini berpengaruh pada nilai K_La_t . Hal ini berkaitan dengan pengaruh gelombang air yang ditimbulkan akibat kondisi *drag in* dan *drag out* saat *liquid film* tergeret disk saat keluar dan masuk kembali dari *bulk reaktor*.

Dari literatur, terdapat tiga pendekatan yang digunakan untuk memodelkan transfer oksigen fisik di RBC. Pendekatan yang pertama, meninjau dari turbulensi aliran, pendekatan yang kedua, meninjau pada *liquid film*, pendekatan ketiga, bahwa nilai transfer oksigen adalah akumulasi dari transfer oksigen akibat turbulensi dan melalui *liquid film* saat terekspose di udara. Maka dalam penelitian ini, digunakan dua skenario, meliputi :

- Skenario 1, pendekatan transfer oksigen melalui turbulensi (K_La_t)

- Skenario 2, pendekatan akumulasi transfer oksigen melalui turbulensi ($K_L a_t$) dan dari *liquid film* di disk ($(K_L a_t)$)

Dibawah ini dibahas lebih detail skenario yang ada.

a. Skenario 1. Transfer Oksigen Melalui Turbulensi ($K_L a_t$)

Penelitian ini pada saat eksperimen, untuk mengukur nilai transfer oksigen fisik, diambil di *bulk reaktor* RBC. Maka pada langkah awal, dianalisa parameter yang berpengaruh pada nilai $K_L a_t$, yaitu nilai $K_L a$ yang disebabkan oleh turbulensi. Ditinjau parameter yang berpengaruh terhadap nilai $K_L a$ dari literatur dan hasil eksperimen. Dari hasil analisa awal, didapatkan bahwa jarak spasi antar disk (S) tidak berpengaruh secara langsung pada nilai $K_L a$ (Mukherji *et al.*, 2008), nilai ini dapat dimasukkan pada *interfacial area* (A_t). Parameter desain dan operasional yang menunjukkan berpengaruh terhadap nilai $K_L a_t$ di dalam bak reaktor, diidentifikasi meliputi : diameter disk (D), jari-jari disk (R), luas disk (A_d), kecepatan putaran (ω), *interfacial area* bak reaktor (A_t), viskositas (μ) dan densitas (ρ) air, *wetted area* (A_w), kedalaman disk (H), kekasaran permukaan disk (K_s). Sehingga dijabarkan dari nilai transfer oksigen fisik pada disk permukaan licin hidraulik, di RBC, sebagai berikut : $K_L a_f = f(D, A_d, \tilde{S}, A_t, A_w, H, R, K_v, \sim, \dots)$ Model ini, didasarkan pada asumsi: pencampuran di reaktor karena kecepatan putaran disk secara sempurna (*complete mixing cinditions*) (Boumansour dan Vasel, 1998). Detail perhitungan analisis dimensi metoda Buckingham- π , sudah dijelaskan di **Lampiran 8**. Untuk **Persamaan 4.8** dijelaskan di bawah ini:

$$K_L a_{t(f)} = k_0 [N_{Re} \times N_{Fr}]^{k_2} \left(\frac{H}{R}\right)^{k_2} \left[\left(\frac{A_d}{A_t}\right) (\omega) \left(\frac{K_v}{D}\right) \left(\frac{A_w}{A_d}\right)\right]^{k_3} k_4 \dots \dots \dots (4.8)$$

Dengan :

- Nilai transfer oksigen karena turbulensi, di *flat disc* : $K_L a_{t(f)}$
- *Number of Reynolds* : $N_{Re} = \frac{D^2 \omega \rho}{\mu}$
- *Number of Froude* : $N_{Fr} = \frac{\omega^2 D}{g}$
- Rasio luas disk dengan interfacial area : $\frac{A_d}{A_t}$
- Kecepatan putaran : ω (rpm)

- Faktor kekasaran permukaan : $\frac{K_v}{D}$
- Rasio *wetted area* dengan *total area* disk : A_w/A_d
- Faktor kedalaman disk terhadap permukaan air : H/R

Dari hasil perhitungan analisis dimensi, metoda Buckingham- π , dari ke sepuluh variabel, terdapat 2 kelompok angka tak berdimensi, yaitu :

- Kelompok pertama, dalam analisis dimensi, dikelompokkan sebagai sebangun dinamik, yang terdiri dari N_{Re} , N_{Fr} , (H/R) , adalah bilangan Sherwood (Boumansour *et al.*, 1998). Bilangan Sherwood merupakan bilangan tak berdimensi yang menyatakan nilai dari koefisien perpindahan massa yang terjadi. Untuk reaktor RBC, dimana disk sebagai media kontak posisinya sebagian didalam air dan sebagian terpapar udara, maka bilangan Sherwood memperhitungkan nilai kedalaman disk, yang disimbolkan H/R .
- Kelompok kedua, adalah sebangun geometri
 - fungsi dari rasio luas permukaan disk terhadap akumulasi jarak antar disk atau *interfacial area* (A_d/A_t), hal ini berkaitan dengan geometri reaktor;
 - pengaruh yang dominan adalah kecepatan putaran disk (ω);
 - pengaruh kekasaran permukaan di disk, berkaitan dengan faktor *wettability* dan geometri reaktor (K_v/D);
 - pengaruh rasio luas disk basah yang keluar dari *bulk reactor* (*wetted area*) terhadap luas disk total (A_w/A_d)

Dari persamaan 4.8, nilai k_0 , k_1 , k_2 , k_3 dan k_4 adalah *fitting parameter*. Dengan menggunakan metoda regresi linier berganda didasarkan dengan hasil eksperimen nilai transfer oksigen fisik. Detail perhitungan dijelaskan di **Lampiran 10**. Dibawah ini, pada **Tabel 4.15**, ditampilkan nilai koefisien untuk nilai $K_L a_t$ *flat disc* di RBC.

Dengan mensubstitusi nilai konstanta pada **Tabel 4.15** terhadap **Persamaan 4.8.**, didapatkan perhitungan nilai koefisien untuk nilai $K_L a_t$ *flat disc*, pada masing-masing material disk. Selisih nilai antara $K_L a$ hasil eksperimen dengan $K_L a$ hasil rumusan juga dievaluasi.

Tabel 4.15. Koefisien Regresi Linier Berganda Nilai $K_L a$ Flat Disc, Skenario 1

No.	Konstanta	Jenis Material Disk		
		Acrylic	Novotex O	Novotex I
1.	K_0	1.0561	1.0560	1.0355
2.	K_1	0.09158	0.06618	0.06713
3.	K_2	0.25620	0.31920	0.3509
4.	K_3	0.28858	0.32840	0.30650
5.	K_4	-0.0009	-0.0001	0.0012
6.	Koefisien determinasi (R^2) Rasio $K_L a_{\text{experimen}}$ vs $K_L a_{\text{rumusan}}$	95.40 %	96.85%	98.9%
7.	Tipe	Linier	Linier	Linier

Didapatkan, pada material *novotex I*, merupakan *fitting* terbaik, dengan koefisien determinasi $R^2=98.9\%$. Sedangkan pada *novotex O* dan *acrylic* yang hidrofobik, rasio yang didapatkan sedikit lebih besar, pada $R^2=95.4\%$ (*acrylic*) dan $R^2=96.85\%$ (*novotex O*). Hal ini berhubungan dengan fenomena sifat disk yang hidrofobik, menyebabkan kurang sempurnanya *liquid* menempel di disk.

b. Skenario 2. Nilai Transfer Oksigen Total ($K_L a$)

Untuk pengembangan model nilai transfer oksigen total ($K_L a$), dilakukan pendekatan rumus yang sama dengan $K_L a_t$. Kontribusi dari difusi oksigen yang melalui *liquid film* diwakilkan melalui ketebalan *liquid film* (δ) sebagai variabel. Dari **Persamaan 4.8** ditambahkan variabel difusi oksigen yang melalui *liquid film*, ditunjukkan dalam **Persamaan 4.9** sebagai skenario 2. Ditambahkannya rasio ketebalan *liquid film* dengan volume reaktor. Persamaannya menjadi :

$$K_L a_{(f)} = k_0 [N_{Re} \times N_{Fr}]^{k_1} \left(\frac{H}{R} \right)^{k_2} \left[\left(\frac{A_d}{A_t} \right) (\omega) \left(\frac{K_v}{D} \right) \left(\frac{A_{lv}}{A_d} \right) \left(\frac{\delta}{V^{0.55}} \right) \right]^{k_3} k_4 \dots \dots \dots (4.9)$$

Dengan :

- Transfer oksigen fisik total di *flat disc* : $K_L a_{(f)}$
- Number of Reynolds : $N_{Re} = \frac{D^2 \omega \rho}{\mu}$
- Number of Froude : $N_{Fr} = \frac{\omega^2 D}{g}$
- Rasio luas disk dengan *interfacial area* : $\frac{A_d}{A_t}$
- Kecepatan putaran : ω (rpm)
- Faktor kekasaran permukaan : $\frac{K_v}{D}$

- Rasio *wetted area* dengan *total area* disk : A_w/A_d
- Rasio ketebalan *liquid film* dengan volume bak reaktor : $\frac{\delta}{V^{0.55}}$
- Faktor kedalaman disk terhadap permukaan air : H/R

Dari **Persamaan 4.9**, nilai k_0 , k_1 , k_2 , k_3 dan k_4 adalah *fitting parameter*. Dengan menggunakan metoda regresi linier berganda didasarkan dengan hasil eksperimen nilai transfer oksigen fisik. Detail perhitungan dijelaskan di **Lampiran 10**. Pada **Tabel 4.16**, ditampilkan nilai koefisien untuk nilai K_{La} total *flat disc* di RBC

Tabel 4.16. Koefisien Regresi Linier Berganda Nilai K_{La} Flat Disc, Skenario 2

No.	Konstanta	Jenis Material Disk		
		<i>Acrylic</i>	<i>Novotex O</i>	<i>Novotex I</i>
1	K_0	1.0629	1.0568	1.0357
2	K_1	0.0345	0.0271	0.0697
3	K_2	0.2628	0.2996	0.2937
4	K_3	0.1788	0.1967	0.2063
5.	K_4	-0.0001	-0.0013	-0.0012
6.	Koefisien determinasi (R^2) Rasio K_{La} eksperimen vs K_{La} rumusan	94.40%	96.98%	99.40%
7.	Tipe	Linier	Linier	Linier

Dengan mensubstitusi nilai konstanta pada **Tabel 4.16** terhadap **Persamaan 4.9**, didapatkan model estimasi nilai K_{La} total di *flat disc*, pada masing-masing material disk. Selisih nilai antara K_{La} hasil eksperimen dengan K_{La} hasil rumusan juga dievaluasi. Didapatkan, pada material *novotex I*, merupakan *fitting* terbaik, materialnya hidrofilik, pada koefisien determinasi $R^2=99.4\%$.

Berkaitan dengan pengaruh ketebalan *liquid film* pada nilai K_{La} total, dari hasil analisis dimensi, didapatkan nilai K_{La} prediksi semakin mendekati dengan K_{La} hasil eksperimen. Jadi, dapat ditegaskan, didapatkan ada pengaruh nilai K_{La_d} pada nilai K_{La} total di RBC. Meskipun nilai transfer oksigen akibat turbulensi (K_{La_t}) lebih dominan dibandingkan K_{La_d} , pada nilai K_{La} total di RBC.

Fenomena tersebut tidak berlaku pada material *acrylic*. Dengan ditambahkan variabel ketebalan *liquid film* $\left(\frac{\delta}{V^{0.55}}\right)$ sebagai K_{La_d} , selisih nilai K_{La} total experimental dengan hasil rumusan menjadi besar. Artinya, pada penelitian ini, di material *acrylic* nilai K_{La_d} tidak berpengaruh pada nilai K_{La} total.

Setelah didapatkan model estimasi pada masing-masing material, maka dilanjutkan dengan melakukan generalisasi untuk model yang sudah terbentuk. Untuk itu dilakukan analisa dengan menggabungkan data material yang memiliki kecenderungan sama.

4.2.4.1.1 Penggabungan Model K_La Di Tiap Material *Flat Disc*

Untuk penggabungan model, pada penelitian ini diuji karakteristik data setiap material di *flat disc*. Material yang ada, terdiri dari 3 macam, yaitu *acrylic*, *novotex O* dan *novotex I*. Diman untuk *acrylic* dan *novotex O*, memiliki sifat hidrofobik, sedang *novotex I* bersifat hidrofilik.

Dalam penelitian ini, material *acrylic* tidak digabung dengan material *novotex O* dan *novotex I*, karena hanya pada material *acrylic* inilah, nilai K_La_d tidak berpengaruh pada nilai K_La total. Dengan menggunakan koefisien pada **Tabel 4.15**, model estimasi transfer oksigen pada material *acrylic*, di *flat disc* adalah :

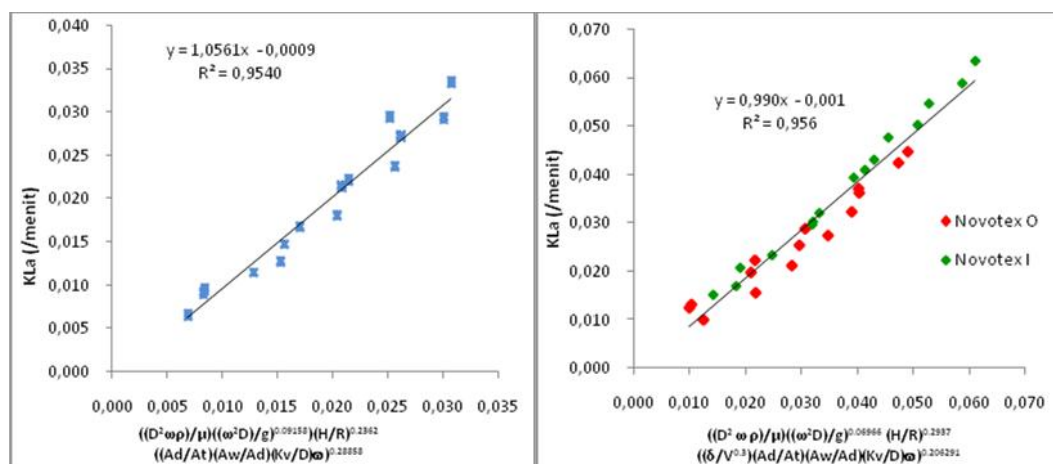
$$K_La = 1.0561 \left(\left(\frac{D^2 \omega \rho}{\mu} \right) \left(\frac{\omega^2 D}{g} \right) \right)^{0.0916} \left(\frac{H}{R} \right)^{0.2562} \left(\left(\frac{A_d}{A_t} \right) \left(\frac{A_w}{A_d} \right) \omega \left(\frac{K_v}{D} \right) \right)^{0.2886} - 0.0009... \quad (4.10)$$

Untuk kekasaran permukaan (K_v) dibawah 10 nm, seperti material *acrylic* untuk memprediksi nilai transfer oksigen fisik, nilai ketebalan *liquid film* tidak diperhitungkan. Hal ini disebabkan permukaan *acrylic* yang super hidrofobik, menyebabkan *liquid film* sebagian besar tidak bisa menempel dengan baik di permukaan disk, pada kecepatan putaran (ω) kurang dari 10 rpm, sehingga, nilai K_La akibat turbulensi lebih dominan.

Selanjutnya untuk material *novotex O* dan *novotex I*, dilakukan penggabungan. Dari hasil analisis gabungan, didapatkan gabungan terbaik menggunakan rumus *novotex I*. Hasil uji regresi linier berganda dan rasio selisih nilai hasil eksperimen dengan nilai prediksi, jika dibandingkan hasilnya, didapatkan nilai yang terbaik. Dijelaskan dalam Persamaan 4.11 :

$$K_La = 1.035 \left(\left(\frac{D^2 \omega \rho}{\mu} \right) \left(\frac{\omega^2 D}{g} \right) \right)^{0.0696} \left(\frac{H}{R} \right)^{0.2937} \left(\left(\frac{A_d}{A_t} \right) \left(\frac{A_w}{A_d} \right) \omega \left(\frac{K_v}{D} \right) \left(\frac{S}{170.33} \right) \right)^{0.2063} - 0.0012 \quad (4.11)$$

Untuk memastikan bahwa **Persamaan 4.10** dan **4.11** konsisten memberikan hasil yang baik, maka dibandingkan dengan data pengukuran. Dijelaskan dalam **Gambar 4.42** rasio nilai K_{La} model, dengan K_{La} eksperimen.



Gambar 4.42. Rasio Nilai K_{La} Model dengan K_{La} Eksperimen di *Flat Disc* (a) Material *acrylic*, $K_v < 10$ nm; (b) Gabungan Material *Novotex O-I*, $K_v > 50$ nm

Pada **Gambar 4.42**, untuk nilai K_v dibawah 10 nm, dengan menggunakan pendekatan **Persamaan 4.10**, didapatkan nilai R^2 mencapai 95.4%, S sebesar 0.0020538 memberikan hasil yang baik. Tidak bisa mencapai 98%, karena material yang digunakan bersifat super hidrofobik, ada kondisi *slip* antara air dengan permukaan disk. Persamaan tersebut, tidak memperhitungkan transfer oksigen melalui *liquid film*, karena *liquid film* yang terbentuk sangat tipis sekali bahkan di kecepatan 1-3 rpm hanya beberapa tetes air saja. Sehingga, dari hasil uji didapatkan nilai K_{La} didominasi oleh K_{La_t} (turbulensi).

Untuk gabungan material *novotex O-I* kekasaran di atas 50 nm, hasil fitting nilai determinasi R^2 mencapai 95.6%, S sebesar 0.0029983 memberikan hasil yang baik, untuk memprediksi nilai K_{La} . Dengan, nilai K_{La} total, memperhitungkan akumulasi dari K_{La_t} dan K_{La_d} .

Model terbangun di atas yang sudah dilakukan generalisasi, akan dilanjutkan dengan memverifikasi model berdasarkan teori yang ada.

4.2.4.1.2 Verifikasi Model Terbangun Nilai Transfer Oksigen (K_{La}) di Disk Permukaan Datar

Verifikasi dalam penelitian ini dilakukan dengan teori yang ada dan hasil eksperimen yang sudah dilakukan. Di bawah ini dijelaskan secara lengkap hasil verifikasi model terbangun.

Didalam sistem RBC, turbulensi ditimbulkan oleh putaran pengaduk mekanis, dalam hal ini adalah disk. Sehingga terjadi pencampuran antar fase *gas-fluid* yang dibangkitkan oleh disk sebagai *impeller* untuk menimbulkan aliran turbulen. Pengaruh kecepatan putaran (ω) pada transfer oksigen fisik di RBC, sudah dijelaskan dari penelitian sebelumnya (Ouano, 1978; Boumansour *et al.*, 1998).

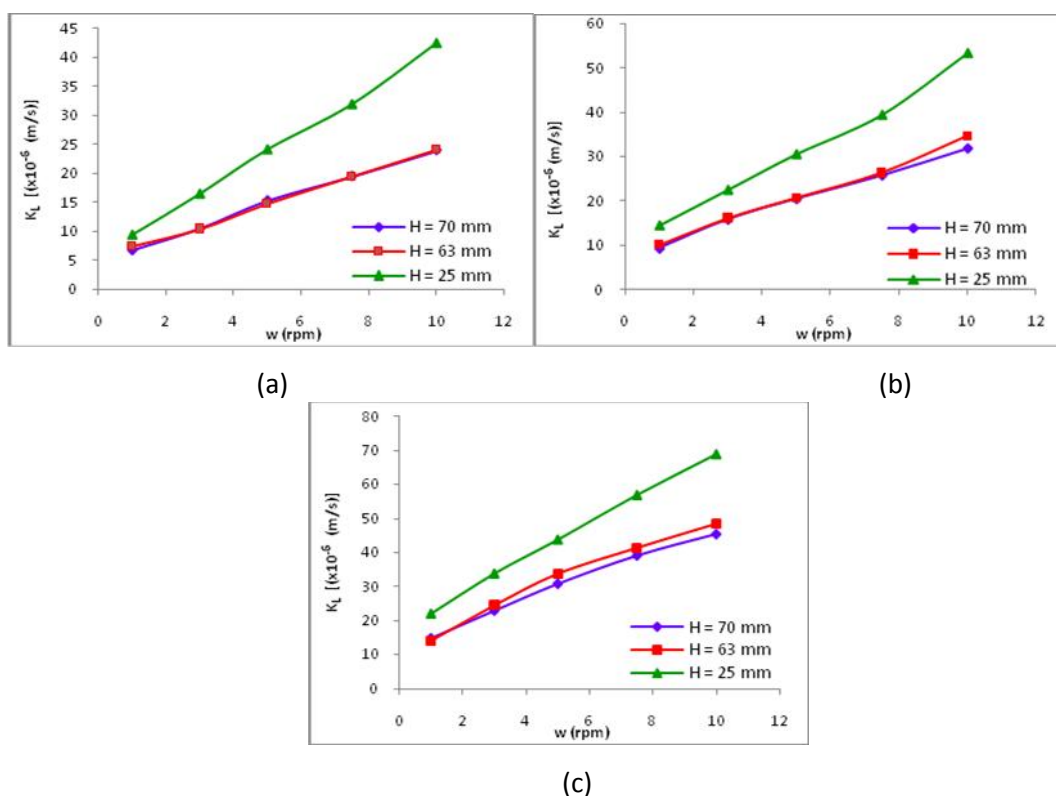
Dari **Persamaan 2.9** dan **2.10** oleh Boumansour *et al.*, 1998 menjelaskan faktor yang berpengaruh terhadap transfer oksigen fisik adalah *Reynolds number* (N_{Re}), *Froude number* (N_{Fr}) dan faktor kedalaman disk (YI). Ketiga bilangan tak berdimensi tersebut adalah *Sherwood number*. *Sherwood number* menggambarkan perpindahan massa antara oksigen dengan air yang terjadi pada proses RBC. Hal ini sesuai dengan model terbangun, yang membuktikan parameter-parameter dinamis tersebut berpengaruh terhadap proses transfer oksigen.

Selain parameter dinamis ditambahkan parameter geometris, yang meliputi: (1) rasio luas disk dengan luas permukaan reaktor, (2) rasio luas disk basah dengan luas *interfacial* reaktor, (3) rasio kekasaran permukaan dengan diameter disk, (4) rasio ketebalan *liquid film* dengan volume air di reaktor saat disk tercelup seluruhnya (*working volume*). Parameter geometris ini dimasukkan dalam model terbangun, yang bertujuan untuk memudahkan mendesain RBC dari skala laboratorium yang nantinya dikembangkan menjadi skala lapangan.

Faktor kedalaman disk, dari hasil eksperimen, didapatkan ada korelasi searah antara H/R dengan nilai $K_L a$. Fenomena ini juga disepakati oleh beberapa peneliti sebelumnya (Yamane dan Yoshida, 1972; Bintanja *et al.*, 1975; Zeevalkink *et al.*, 1978). Hanya saja, dalam penelitian mereka nilai $K_L a$ tidak digunakan dalam satuan per menit, tetapi nilai K_L dalam satuan m/dt, dapat dilihat pada **Gambar 2.6**. Sehingga, jika mengacu pada **Gambar 2.6** tersebut, maka korelasi antara H/R dengan nilai $K_L a$, menjadi tidak searah. Sedang dalam model ini, korelasi H/R dengan nilai $K_L a$ adalah searah. Jika dari data penelitian ini, nilai

K_{La} satuannya diubah menjadi m/dt, maka fenomena akan sama dengan penelitian sebelumnya. Untuk mendapatkannya, mengacu pada perhitungan Zeevalkink *et al.*, 1979, maka: K_L (m/dt) = (A_w /Vol) x K_{La} (menit⁻¹).

Untuk lebih jelasnya, hubungan K_L terhadap kecepatan putaran, berdasar dari literatur (Zeevalkink *et al.*, 1979; Yamane & Yoshida, 1972). Literatur tersebut yang berpijak pada pendekatan pertama, bahwa mekanisme transfer oksigen (K_{La}) di RBC melalui *liquid film*. Dapat dilihat pada **Gambar 4.43** di bawah ini, hubungan K_L dan ω Terhadap nilai K_L



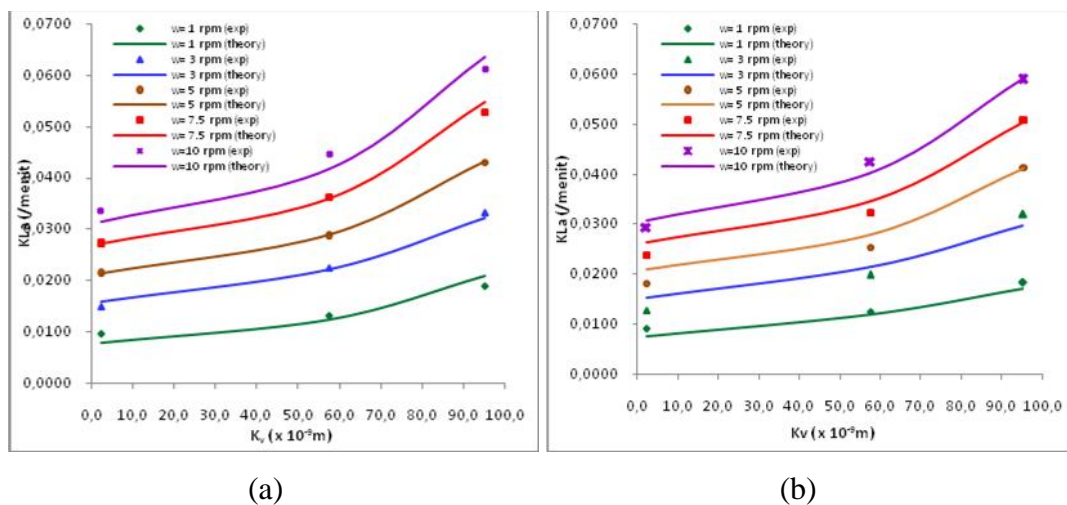
Gambar 4.43. Hubungan K_L dan ω Terhadap nilai K_L , di Material: (a) *Acrylic*; (b) *Novotex O* dan (c) *Novotex I*

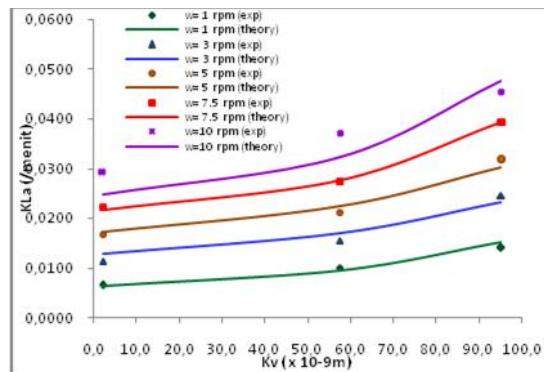
Dari **Gambar 4.43** dapat dilihat, jika nilai K_L diubah menjadi m/dt, dan luas yang dominan berpengaruh terhadap nilai K_{La} adalah A_w . Jika ditinjau hanya *wetted area* saja (A_w), maka kedalaman disk tertinggi berdasarkan nilai K_{La} di H terendah, sesuai dengan H di ketebalan *liquid film* tertinggi. Untuk itu, inilah alasan mengapa peneliti sebelumnya (Yamane dan Yoshida, 1972; Bintanja *et al.*, 1975; Zeevalkink *et al.*, 1978) yang meyakini transfer oksigen hanya melalui

liquid film yang terpapar di udara. Hal ini karena ditinjau fenomena peningkatan transfer oksigen searah dengan ketebalan *liquid film*, pada kedalaman disk yang optimal sama yaitu di H terendah. Sayangnya yang mereka tinjau hanya pada luas basah (A_w) tanpa memperhitungkan A_d (luas disk) dan A_t (*interfacial area*).

Parameter $\delta/V^{0.33}$ adalah parameter untuk transfer oksigen melalui *liquid film* (K_{La_d}). Korelasi yang searah dari $\delta/V^{0.33}$ terhadap nilai K_{La} pada hubungan kecepatan putaran. Jika kecepatan putaran meningkat, nilai $\delta/V^{0.33}$ meningkat maka ada peningkatan nilai K_{La} . Hal ini sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Kubsad *et al.*, (2004). Dimana transfer oksigen dalam penelitiannya dibentuk dari *volume renewal number* (N_v), yang proporsional searah dengan ketebalan *liquid film*, tetapi berkebalikan arah dengan volume reaktor. Hal ini, juga sama dengan penelitian Mukherji *et al.*, 2008, yang mempelajari pengaruh geometri reaktor terhadap nilai K_{La} . Dengan pendekatan analisis dimensi, didapatkannya ada pengaruh $\delta/V^{0.33}$ terhadap transfer oksigen total di RBC.

Parameter $\left(\frac{K_v}{D}\right)$, adalah parameter untuk kekasaran permukaan pada disk permukaan licin hidraulis. Nilai K_{La} akan meningkat pada peningkatan K_v . Dalam penelitian ini, digunakan nilai K_v pada kisaran 2.152 – 95.262 nm. K_v ini berkaitan dengan jenis material yang digunakan oleh disk sebagai media kontak. Untuk lebih jelasnya, **Gambar 4.44** Hubungan nilai K_{La} dengan K_v





(c)

Gambar 4.44. Hubungan nilai Transfer Oksigen (K_{La}) Dengan Kekasaran Permukaan (K_v), di kedalaman (a) $H=7$ cm; (b) $H=6.3$ cm (c) $H=2.5$ cm

Dari **Gambar 4.44**, dapat digambarkan dengan meningkatkan nilai kekasaran permukaan (K_v) meningkatkan nilai K_{La} , fenomena ini konsisten di kedalaman disk terhadap permukaan air yang berbeda. Parameter ini adalah kebaruan dalam penelitian ini, karena sepengetahuan penulis belum ada yang meneliti pengaruh kekasaran permukaan (K_v) terhadap nilai K_{La} .

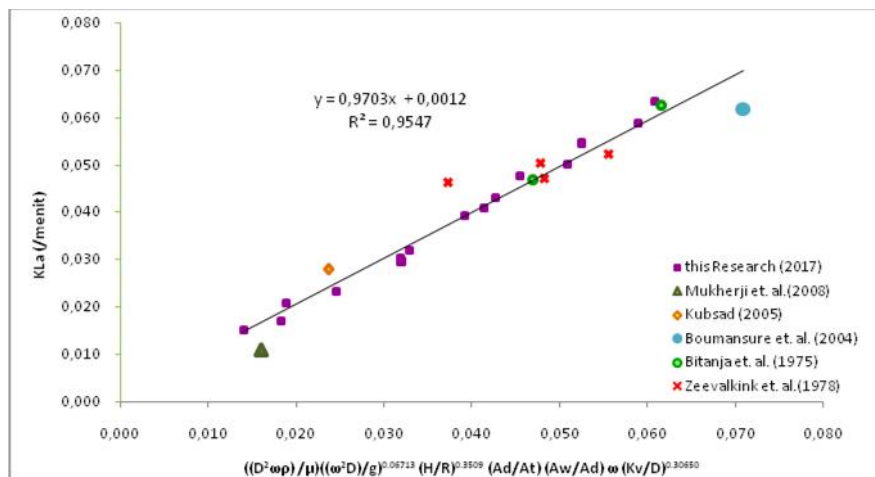
Verifikasi model sudah dilakukan, dilanjutkan dengan memvalidasi model terhadap penelitian yang sudah dilakukan.

4.2.4.1.3 Validasi Model Nilai Transfer Oksigen (K_{La}) di Disk Permukaan Datar

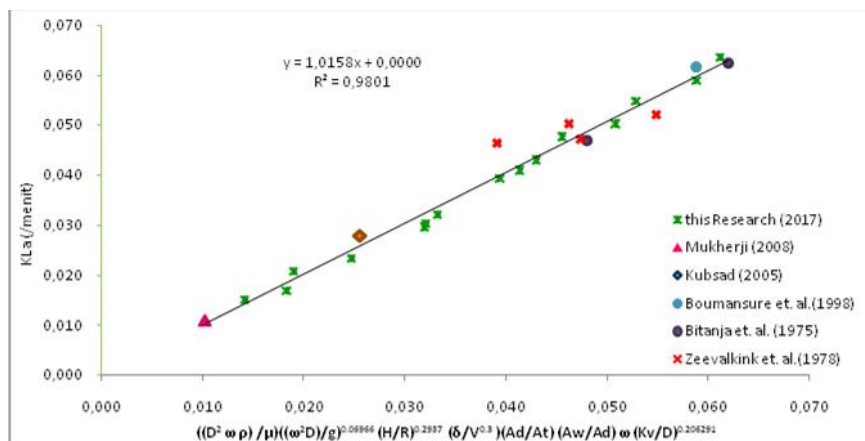
Validasi model dalam penelitian ini, bertujuan untuk menguji model K_{La} terbangun, dengan literatur yang sudah ada.

a. Validasi Model Terbangun Nilai K_{La} Dari Literatur Yang Ada

Beberapa literatur sudah membahas prediksi transfer oksigen fisik di RBC. Tetapi literatur tersebut memiliki pendekatan yang berbeda tentang K_{La} . Seperti yang sudah dijelaskan di atas, terdapat tiga pendekatan untuk menentukan K_{La} total. Dalam penelitian ini, akan diuji model transfer oksigen di skenario 1 dan 2 (**Persamaan 4.10** dan **4.11**) terhadap literatur yang ada, yang memiliki geometri reaktor dan parameter operasional yang berbeda. Dibawah ini diuji model terbangun terhadap literatur yang ada, pada **Gambar 4.45**



(a)



(b)

Gambar 4.45. Validasi Non-Dimensional Model Untuk K_{La} di *Flat Disc*, (a) Uji Dari **Persamaan 4.10**; (b) Uji Dari **Persamaan 4.11**

Pada **Gambar 4.45**, untuk grafik (a) menunjukkan uji dari **Persamaan 4.10**, persamaan untuk nilai transfer oksigen karena turbulensi. Sedang pada grafik (b) menunjukkan uji dari **Persamaan 4.11**, persamaan untuk nilai transfer oksigen total. Dari hasil uji dengan literatur didapatkan, ada pengaruh transfer oksigen fisik melalui *liquid film* (K_{La_d}) dan transfer oksigen melalui turbulensi (K_{La_t}).

b. Analisis Sensitivitas Model Terbangun

Sensitifitas dari tiap variabel grup non dimensionless K_{La} dengan menetapkan parameter operasional dan reaktor, dapat dilihat pada **Tabel 4.17** di bawah ini.

Tabel 4.17. Kisaran Nilai Parameter Untuk Model K_{La} Terbangun

Model 1	Model Untuk $K_L a_r$ (Nilai $K_L a$ Akibat Turbulensi)										
Parameter	D (m)	W (rpm)	$Ad \times 10^{-2}$ (m ²)	$At \times 10^{-2}$ (m ²)	$Aw \times 10^{-2}$ (m ²)	$H \times 10^{-2}$ (m)	$K_v \times 10^{-2}$ (μm)	ω (rad/min)	$K_L a \times 10^{-2}$ (/menit)		
Nilai Parameter	0.08–0.60	1–10	9.5– 565.5	0.35–27.0	8.7–559.8	2.0–17.0	0.22–9.53	0.105–1.047	1.60–6.80		
Dimensionless number	$(D^2 \omega \rho) / \mu$	$(\omega^2 D)/g$	$\left(\left(\frac{D^2 \omega \rho}{\mu} \right) \left(\frac{\omega^2 D}{g} \right) \right)$	A_d/A_t	A_w/A_d	K_v/D	$\left(\left(\frac{A_d}{A_t} \right) \left(\frac{A_w}{A_d} \right) \omega \left(\frac{K_v}{D} \right) \right)$	H/R			
Nilai	63.14x10 ²	2.57 x10 ⁴		2.519	0.5775	0.94x10 ⁸			0.4458		
Dimensionless	–	–	1.0331–1.9826	–	–	–	0.0126–0.0888	–	–		
Number	3838.39x10 ²	697.82 x10 ⁴		53.900	0.9744	41.42 x10 ⁸			0.9627		
Model 2	Model Untuk $K_L a$ (Nilai $K_L a$ Total)										
Parameter	D (m)	W (rpm)	$Ad \times 10^{-2}$ (m ²)	$At \times 10^{-2}$ (m ²)	$Aw \times 10^{-2}$ (m ²)	$V \times 10^{-3}$ (m ³)	$H \times 10^{-2}$ (m)	$K_v \times 10^{-2}$ (μm)	ω (rad/min)	$K_L a \times 10^{-2}$ (/menit)	δ (μm)
Nilai Parameter	0.08 – 0.60	1–10	9.56–565.5	0.35–27	8.7–559.8	0.85–44.30	2.0–17.0	0.22–9.53	0.105–1.047	1.02–6.19	9.48–67.0
Dimensionless number	$(D^2 \omega \rho) / \mu$	$(\omega^2 D)/g$	$\left(\left(\frac{D^2 \omega \rho}{\mu} \right) \left(\frac{\omega^2 D}{g} \right) \right)$	A_d/A_t	A_w/A_d	K_v/D	$(\delta/V^{0.33})$	$\left(\left(\frac{A_d}{A_t} \right) \left(\frac{A_w}{A_d} \right) \omega \left(\frac{K_v}{D} \right) \left(\frac{\delta}{V^{0.33}} \right) \right)$	H/R		
Nilai	63.14x10 ²	2.57 x10 ⁴		2.519	0.5775	0.94x10 ⁸	9.98x10 ⁵				0.509
Dimensionless	–	–	1.0343–2.0344	–	0.5775 –	–	–	0.0079–0.0653	–	–	–
Number	3838.39 x10 ²	697.82 x10 ⁴		53.900	0.9744	41.42 x10 ⁸	4255.84 x10 ⁵				0.969

Dari Tabel 4.17, pengaruh dari parameter $\left(\left(\frac{A_d}{A_t} \right) \left(\frac{A_w}{A_d} \right) \omega \left(\frac{K_v}{D} \right) \right)$, adalah fungsi dari kecepatan putaran, diameter disk, jumlah disk, jarak antar disk, volume reaktor dan kekasaran permukaan disk. Nilai ini pada kisaran 1.0331–1.9826 pada K_{La_t} dan 1.0343–2.0344 pada K_{La} . Pengaruh dari parameter (A_d/A_t dan A_w/A_d) menunjukkan dengan meningkatkan luas tangki dan mengurangi luas basah disk, akan mengurangi nilai transfer oksigen total. Dengan memperbesar luas basah disk, memperbesar turbulensi yang dihasilkan dari gelombang air saat disk masuk kembali kedalam permukaan air (*drag in*).

K_{La} sebagai fungsi ($\delta/V^{0.33}$), parameter ini pada kisaran (9.98x10⁵ - 4255.84 x10⁵). Parameter ini adalah fungsi dari rasio dari volume reaktor dan ketebalan *liquid film*. Nilai *liquid film* meningkat, akan meningkatkan nilai transfer oksigen total. Hal ini sesuai dengan hasil yang dilaporkan oleh Zeevalkink *et al.*, 1979; Kubsad *et al.*, 2004; Mukherji *et al.*, 2008.

K_{La} sebagai fungsi dari (K_v/D), yaitu faktor kekasaran suatu permukaan solid, faktor ini adalah salah satu kebaruan dari penelitian ini. Dimasukkannya faktor kekasaran permukaan tersebut, karena berhubungan dengan *wettability*.

Yaitu kemampuan permukaan disk untuk dapat menggeret *liquid film* dan *boundary film* di RBC. Faktor ini menjadi penting, karena berpengaruh terhadap ketebalan *liquid film* dan nilai K_{La} , semakin besar nilai K_v maka ketebalan *liquid film* meningkat dan transfer oksigen juga meningkat. Pada penelitian ini, nilai K_v pada kisaran (2 – 98 nm).

K_{La} juga sebagai fungsi dari (H/R), yaitu faktor kedalaman disk. Nilai ini pada kisaran 0.4458-0.9627 pada K_{La_t} dan 0.5085 - 0.9687 pada K_{La} . Pengaruh H/R menunjukkan dengan meningkatkan nilai H didapatkan nilai K_{La_t} dan K_{La} meningkat. Hal ini berlaku pada semua jenis material disk. Hal ini sepakat dengan hasil yang dilaporkan oleh Bintanja *et al.*, 1975, dan Zeevalkink *et al.*, 1979.

Model empirik di *flat disc* sudah selesai dilakukan, maka pembahasan dilanjutkan untuk disk berkontur di RBC.

4.2.4.2. ANALISIS DIMENSI TRANSFER OKSIGEN FISIK DISK PERMUKAAN BERKONTUR DI RBC

Setelah memodelkan nilai K_{La} di *flat disc* seperti yang telah didiskusikan di sub bab 4.2.4.1. Maka pembahasan dilanjutkan memodelkan K_{La} di *contoured disc*. Faktor yang diperhitungkan adalah kekasaran permukaan dan pola kontur yang digunakan. Kekasaran permukaan (K_{vg}) yang diperhitungkan, adalah kekasaran dan pola kontur.

Pada awal penelitian dilakukan analisa pada parameter yang berpengaruh terhadap nilai K_{La} di *flat disc* yang meliputi: diameter disk (D), jari-jari disk (R), luas disk (A_d), kecepatan putaran (ω), luas *interfacial area* bak reaktor (A_t), luas disk basah (*wetted area*) (A_w), luas volume bak reaktor (V), ketebalan *liquid film* (δ), kedalaman disk (H), kekasaran permukaan disk (K_v), viskositas (μ) dan densitas (ρ) air. Pada K_{La} di permukaan berkontur, membutuhkan tambahan parameter, yaitu faktor kekasaran permukaan berkontur (K_g).

Sehingga dijabarkan dari nilai transfer oksigen fisik pada disk permukaan berkontur, di RBC, sebagai berikut :

$$K_{La_g} = f(D, A_d, \tilde{S}, A_t, A_w, V, u, H, R, K_{vg}, \sim, \dots) \dots\dots\dots (4.12)$$

Dari variabel pada **Persamaan 4.12** tersebut di atas, terdapat 3 kelompok angka tak berdimensi. Detail perhitungan dijelaskan di **Lampiran 8**, Selanjutnya dijelaskan pada **Persamaan 4.13** di bawah ini:

$$KLa_g = K_o [N_{Re} \times N_{Fr}]^{k_1} \left(\frac{H}{R}\right)^{k_2} \left[(S_i)(\omega) \left(\frac{K_{vg}}{D}\right) \left(\frac{A_w}{A_d}\right) \left(\frac{\delta}{V^{0.33}}\right) \right]^{k_3} k_4 \dots \dots \dots (4.13)$$

Dari hasil perhitungan, didapatkan bahwa nilai transfer oksigen dipengaruhi oleh :

- a. Kelompok pertama, dalam analisis dimensi dikelompokkan sebagai sebangun dinamik, yang terdiri dari N_{Re} , N_{Fr} , (H/R) , adalah bilangan Sherwood (Boumansour *et al.*, 1998). Bilangan Sherwood merupakan bilangan tak berdimensi yang menyatakan nilai dari koefisien perpindahan massa yang terjadi. Untuk reaktor RBC, dimana disk sebagai media kontak posisinya sebagian didalam air dan sebagian terpapar udara, maka bilangan Sherwood memperhitungkan nilai kedalaman disk, yang disimbolkan H/R .
- b. Kelompok kedua, sebangun geometrik, yang terdiri dari :
 - S_i : *specific interfacial*, merupakan dimensionless geometri reaktor yang berkaitan dengan proporsi diameter disk terhadap jarak antar disk
 $= (D/A_t^{0.5})$,
 - ω : pengaruh yang dominan adalah kecepatan putaran disk;
 - K_{vg}/D : pengaruh kekasaran permukaan di disk, berkaitan dengan faktor *wettability* dan geometri reaktor;
 - A_w/A_d : pengaruh rasio luas disk basah karena menempelnya *liquid film* (*wetted area*) terhadap luas disk total
 - $\delta/V^{0.33}$: fungsi dari ketebalan *liquid film* dengan *working volume* reaktor

Dari **Persamaan 4.13**, nilai k_0, k_1, k_2, k_3 dan k_4 adalah *fitting parameter*. Dengan menggunakan metoda regresi linier berganda didasarkan dengan hasil eksperimen. Dari perhitungan tersebut, didapatkan nilai koefisien untuk KLa di *contoured disc* pada RBC.

Tabel 4.18. Nilai Koefisien Hasil Simulasi Regresi Linier Berganda Untuk K_{La} *Contoured Disc*

No.	Konstanta	Jenis Material Disk					
		<i>Contoured Disc - Novotex I</i>			<i>Contoured Disc - Novotex O</i>		
		Tipe 1	Tipe 2	Tipe 3	Tipe 1	Tipe 2	Tipe 3
1.	K_0	1.0139	0.9887	1.0061	1.0888	1.0252	1.0547
2.	K_1	0.03083	0.00395	0.02563	0.02869	0.03254	0.03135
3.	K_2	0.02461	0.10423	0.13308	0.05000	0.20490	0.29030
4.	K_3	0.33040	0.29838	0.30067	0.33915	0.31494	0.29731
5.	K_4	-0.0007	+0.0007	-0.0004	-0.0032	-0.0010	-0.0025
6.	Koefisien determinasi (R^2) Rasio $\delta_{\text{eksperimen}}$ VS δ_{rumusan}	99.32 %	98.92 %	99.00%	96.70 %	97.90 %	96.50 %

Dengan mensubstitusi nilai konstanta pada **Tabel 4.18** terhadap **Persamaan 4.13**, didapatkan nilai koefisien untuk K_{La} di disk permukaan berkontur di tiap tipe disk.

Untuk generalisasi model pada penelitian ini, diuji kedekatan data setiap tipe kontur dan sifat material. Dari uji tersebut, didapatkan model transfer oksigen fisik untuk disk berkontur, yang dikelompokkan menjadi 2 model, yaitu

- Model 1 – tipe 1 dan 2 (hidrofilik dan hidrofobik)
- Model 2 – tipe 3 (hidrofilik dan hidrofobik)

Sehingga persamaan analisis dimensi yang digunakan :

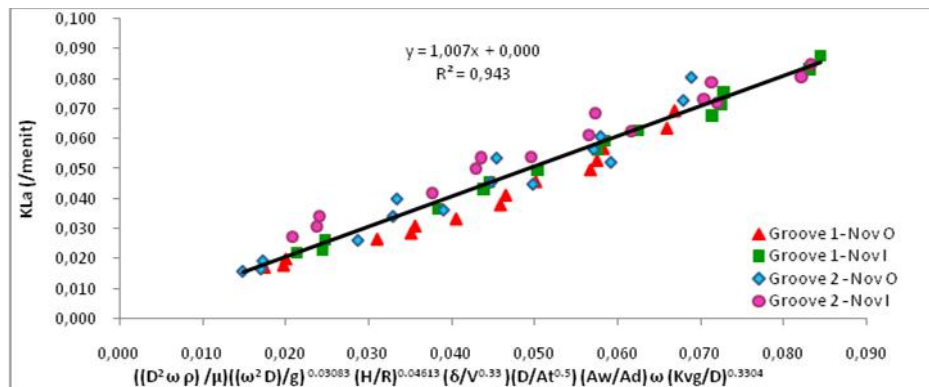
Model 1, Untuk disk berkontur dengan pola radial, material hidrofilik dan hidrofobik

$$KLa_{g1-2} = 1.014 [N_{Re} \times N_{Fr}]^{0.031} \left(\frac{H}{R}\right)^{0.025} \left[(S_i)(\omega) \left(\frac{K_{vg}}{D}\right) \left(\frac{Aw}{Ad}\right) \left(\frac{\delta}{V^{0.33}}\right)\right]^{0.220} - 0.001.....(4.14)$$

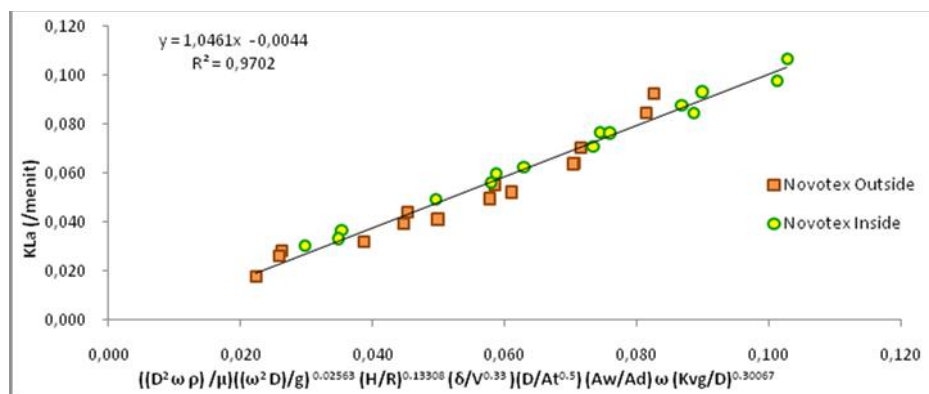
Model 2, Untuk disk berkontur dengan pola radial, dengan tambahan pola vertikal, di material hidrofilik dan hidrofobik

$$KLa_{g2} = 1.006 [N_{Re} \times N_{Fr}]^{0.026} \left(\frac{H}{R}\right)^{0.122} \left[(S_i)(\omega) \left(\frac{K_{vg}}{D}\right) \left(\frac{Aw}{Ad}\right) \left(\frac{\delta}{V^{0.33}}\right)\right]^{0.201} - 0.0004.....(4.15)$$

Dibawah ini diuji ke dua model terbangun dengan pengabungan data, pada **Gambar 4.46**



(a)



(b)

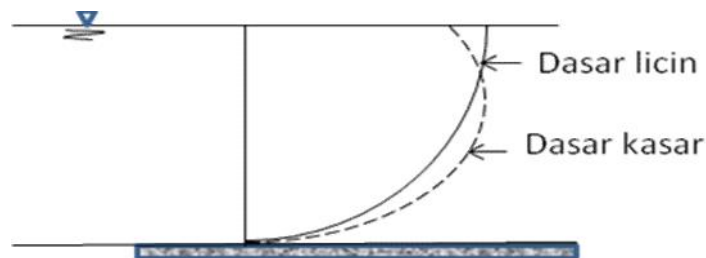
Gambar 4.46. Rasio Nilai K_{La} Model dengan K_{La} Eksperimen di *Contoured Disc*; (a) Pola radial; (b) Pola radial – vertikal

Pola dari *Contoured disc* dalam penelitian ini, bentuk kontur yang digunakan adalah kotak dan membentuk radial, sesuai bentuk lingkaran disk. Dan ditambahkan pula pola radial tersebut dimodifikasi dengan pola vertikal seperti pada *contoured disc* tipe 3. Nilai K_{La} di *contoured disc* tipe 3 lebih besar daripada pola radial tanpa modifikasi (tipe 1 dan 2). Dari **Gambar 4.46** tersebut, untuk **Persamaan 4.14** dan **Persamaan 4.15** didapatkan nilai R^2 mencapai 94.3%, $S=0.0048296$ (untuk gabungan tipe 1 dan 2) dan R^2 sebesar 97.02%, $S=0.0042396$ (untuk tipe 3), memberikan hasil yang baik untuk ketiga tipe *contoured disk*.

Pembahasan tentang membangun model empirik untuk mengestimasi nilai K_{La} di *flat* dan *contoured disc*, sudah selesai. Maka pembahasan dilanjutkan dengan menganalisa lebih lanjut nilai kekasaran permukaan yang merupakan *novelty* dari penelitian ini.

4.3. Variabel Baru Yang Mewakili Kekasaran dan Pola Kontur di Permukaan Disk

Dari hasil evaluasi pada ketebalan *liquid film* (δ) dan transfer oksigen (K_{La}) di RBC, didapatkan ada pengaruh kekasaran permukaan (K_{vg}). Kekasaran permukaan berpengaruh pada gaya gesek *liquid* di permukaan *solid* (*shear condition*). Elemen kekasaran permukaan ini, berpengaruh terutama pada kemiringan pembagian kecepatan pada lapisan di dekat permukaan disk (*boundary layer*) (Anggrahini, 2005). Akan lebih jelas dilihat pada ilustrasi **Gambar 4.47** di bawah ini :



Gambar 4.47. Pengaruh Kekasaran Permukaan Pada Diagram Pembagian Kecepatan suatu saluran terbuka (Anggrahini, 2005)

Dalam penelitian ini, elemen kekasaran permukaan (K_{vg}), terbagi menjadi 2 macam, yaitu kekasaran permukaan mikroskopik (K_v) dan kekasaran permukaan makroskopik (K_g). Kedua tipe kekasaran permukaan tersebut, berpengaruh terhadap karakteristik ketebalan *liquid film* dan mekanisme transfer oksigen fisik di RBC.

Variabel untuk kekasaran permukaan yang digunakan dalam penelitian ini berbeda dengan literatur. Hal ini disebabkan, literatur yang ada mengkaji pengaruh kekasaran permukaan di saluran terbuka dan tertutup pada aliran horizontal, sedangkan dalam penelitian ini, aliran yang diputar secara vertikal. Dari literatur, percobaan Nikuradse (dalam Anggrahini, 2005), dibedakan aliran berdasarkan tipe dari resime aliran. Tipe resime aliran, dihubungkan dengan rasio antara kekasaran Nikuradse (K_s) dengan skala panjang dari lapisan viskus ($9/u_*$), dengan u_* kecepatan rata-rata. Sudah dijelaskan pada **Persamaan 2.22**. Untuk nilai tipe *contoured disc* (K_g), berdasarkan tipe resim aliran Nikuradse, dalam

penelitian ini lebih ke tipe aliran akibat turbulensi. Merujuk di **Persamaan 2.22** maka untuk tipe disk yang berkontur (K_g), dapat dilihat pada **Tabel 4.19**.

Tabel 4.19. Tipe Resime Berdasar Kekasaran Permukaan (K_g) di RBC

K_{vg} (m)	w (rpm)	U_* (m/dt)	$\frac{u_* K_s}{\vartheta}$	Tipe Resime
1. Flat disc				
a. <i>Acrylic</i>	1,3,5,7.5,10	0.012;0.036; 0.059;0.090; 0.120	$2.943.10^{-5}$ - $2.943.10^{-4}$	Resime licin hidraulik
b. <i>Novotex O</i>	1,3,5,7.5,10	0.012;0.036; 0.059;0.090; 0.120	$7.874.10^{-5}$ - $7.874.10^{-4}$	Resime licin hidraulik
c. <i>Novotex I</i>	1,3,5,7.5,10	0.012;0.036; 0.059;0.090; 0.120	$13.028.10^{-5}$ - $13.028.10^{-4}$	Resime licin hidraulik
2. Contoured disc				
0.003 <i>ContourDisc</i> , Tipe 1,2,3	1	0.012	41.030	Resime transisi hidraulik
	3	0.036	123.091	Resime kasar hidraulik
	5	0.059	201.732	Resime kasar hidraulik
	7.5	0.090	307.727	Resime kasar hidraulik
	10	0.120	410.303	Resime kasar hidraulik

Dari **Tabel 4.19**, hanya di kecepatan putaran 1 rpm, memiliki resime yang berbeda dibandingkan dengan kecepatan putaran lainnya. Kenyataannya dalam hasil eksperimen, pada *contour disc*, tidak ada perbedaan yang signifikan pada kecepatan 1-10 rpm. Setelah kecepatan 10 rpm, yaitu 15 dan 20 rpm, terdapat perbedaan yang signifikan pada ketebalan *liquid film* yang meningkat drastis. Sehingga resime yang digunakan Nikuradse, untuk aliran yang diputar oleh disk secara vertikal dan disk tenggelam sebagian di *bulk reactor*, belum bisa mewakili pola aliran yang ada.

Tipe resime Nikuradse tersebut, jika diterapkan pada *flat disc* di penelitian ini (**Tabel 4.19**), untuk semua material disk yang digunakan (*acrylic*, *novotex O* dan *novotex I*), dikategorikan sebagai resime licin hidraulik. Resime aliran Nikuradse, tidak spesifik untuk pengaruh kekasaran secara mikroskopik (K_v). Karena terdapat perbedaan pola aliran dalam penelitian Nikuradse dengan penelitian ini. Perbedaannya adalah penelitian Nikuradse aliran horizontal untuk penampang terbuka dan tertutup. Sedang dalam penelitian ini, aliran yang diputar

secara vertikal dan sebagian disknya tenggelam didalam air, di penampang terbuka.

Berdasarkan tipe aliran yang spesifik tersebut, maka dalam penelitian ini dianalisa beberapa variabel kekasaran permukaan yang berpengaruh. Selain variabel kekasaran juga perlunya diperhitungkan pola kontur dari kekasaran permukaan secara makroskopik. Maka diperkenalkan variabel baru, yaitu N_{ITS} , yaitu angka yang menunjukkan kekasaran dan pola kontur di permukaan solid, dengan sistem aliran berputar vertikal (*rotating vertically flow*)

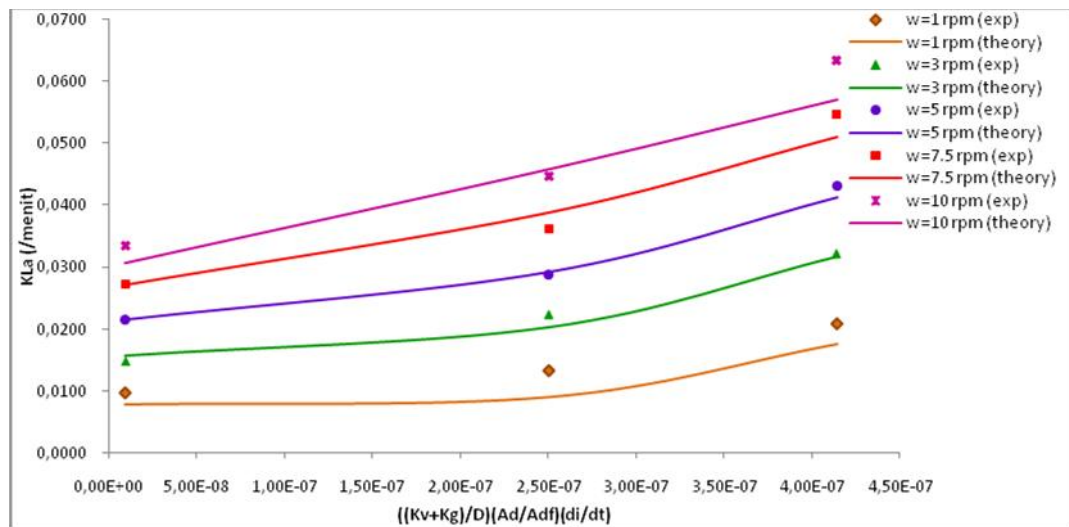
$$(N_{ITS}) = \left(\frac{K_v + K_g}{D} \right) \left(\frac{A_d}{A_{df}} \right) \left(\frac{d_i}{d_t} \right) \dots\dots\dots (4.16)$$

Hasil perhitungan *number of roughnes and pattern of contour* (N_{ITS}), dijelaskan dalam **Tabel 4.20**. Nilai K_{ITS} di disk permukaan datar dan berkontur

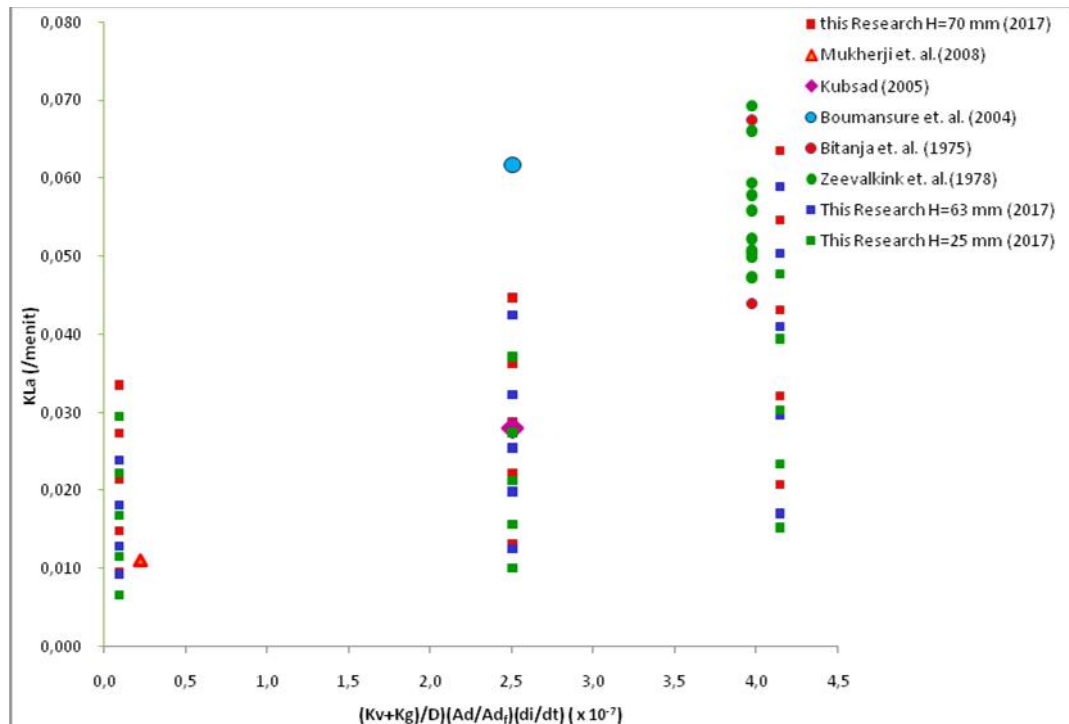
Tabel 4.20. Nilai K_{ITS} di disk permukaan datar dan berkontur

No.	Keterangan	N_{ITS}
A. Flat Disc		
1	Flat disc, material acrylic, $K_{v-acrylic} = 2.152 \text{ \& } 2.158 \text{ nm}$	9.4×10^{-9}
2	Flat disc, material novotex O, $K_{v-nov O} = 50.907 \text{ \& } 57.572 \text{ nm}$	2.503×10^{-7}
3	Flat disc, material novotex I, $K_{v-nov I} = 88.352 \text{ \& } 95.262 \text{ nm}$	4.142×10^{-7}
B. Contoured Disc (roughness type kotak, $K_g = 3 \text{ mm}$)		
4	Contour disc type 1, $d_i = 9 \text{ mm}$, $d_y = 9 \text{ mm}$, $d_t = 18 \text{ mm}$	
	- hidrofilik, $K_{v-nov I} = 95.262 \text{ nm}$	0,0163254
	- hidrofobik, $K_{v-nov O} = 57.572 \text{ nm}$	0,0163252
5	Contour disc type 2, $d_i = 10 \text{ mm}$, $d_y = 15 \text{ mm}$, $d_t = 25 \text{ mm}$	
	- hidrofilik, $K_{v-nov I} = 95.262 \text{ nm}$	0,0124325
	- hidrofobik, $K_{v-nov O} = 57.572 \text{ nm}$	0,0124322
6	Contour disc type 3, $d_i = 9 \text{ mm}$, $d_y = 9 \text{ mm}$, $d_t = 18 \text{ mm}$	
	- hidrofilik, $K_{v-nov I} = 95.262 \text{ nm}$	0,0180522
	- hidrofobik, $K_{v-nov O} = 57.572 \text{ nm}$	0,0180519

Digambarkan nilai N_{ITS} terhadap K_{La} , di *flat* dan *contoured disc*. Karena kedua tipe kekasaran tersebut, memiliki kisaran nilai yang jauh selisihnya. Bialangan N_{ITS} pada nilai K_{La} di *flat disc* pada berbagai kedalaman disc, dapat dilihat pada **Gambar 4.48**



(a)



(c)

Gambar 4.48. Bilangan N_{ITS} Pada Nilai K_{La} Flat Disc di Kedalaman Disk (a) $H=7$ cm; (b) Validasi Dengan Peneliti Lain

Dari **Gambar 4.48**, dapat terlihat jelas pengaruh N_{ITS} pada profil nilai K_{La} di flat disc. Terdapat perbedaan yang signifikan antara N_{ITS} kurang dari 10×10^{-9} m dengan diatas 50×10^{-9} m pada hasil nilai K_{La} . Perbedaan nilai tersebut, sudah dibuktikan dalam model K_{La} di flat disc, metoda analisis dimensi.

Sehingga untuk memprediksi nilai K_{La} di *flat disc*, dibedakan dalam kisaran nilai NRV, seperti pada **Persamaan 4.10** dan **4.11**. Sehingga kalau ditata ulang:

- Rumus untuk K_{La} dengan $10 \times 10^{-9} \leq N_{ITS}$ dimana ketebalan *liquid film* (δ) tidak berpengaruh, $K_{La} \text{ total} = K_{La_t}$

$$K_{La} = 1.0561 \left(\left(\frac{D^2 \omega \rho}{\mu} \right) \left(\frac{\omega^2 D}{g} \right) \right)^{0.09158} \left(\frac{H}{R} \right)^{0.2561} \left(\left(\frac{A_d}{A_t} \right) \left(\frac{A_w}{A_d} \right) \omega \left(\frac{K_v}{D} \right) \right)^{0.29858} - 0.0009$$

- Rumus untuk K_{La} dengan $2 \times 10^{-7} \leq N_{ITS} \leq 5 \times 10^{-7}$ dimana ketebalan *liquid film* (δ) berpengaruh, $K_{La} \text{ total} = K_{La_t} + K_{La_d}$

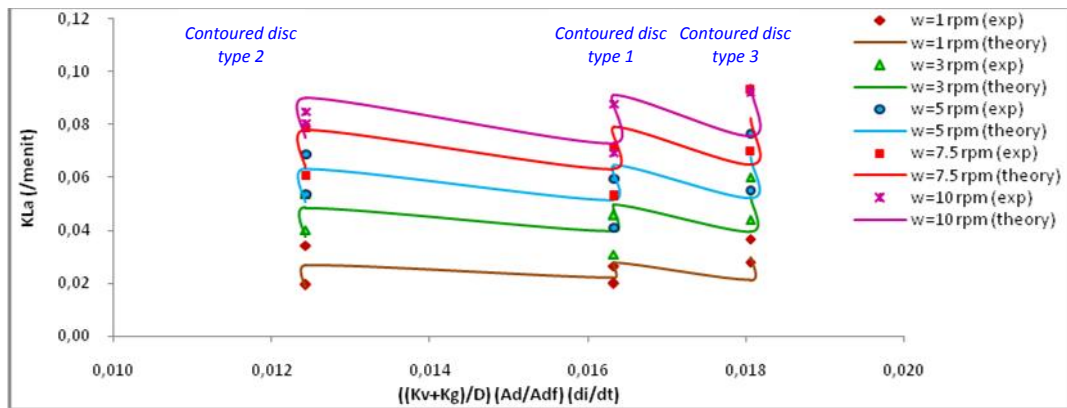
$$K_{La} = 1.035 \left(\left(\frac{D^2 \omega \rho}{\mu} \right) \left(\frac{\omega^2 D}{g} \right) \right)^{0.06966} \left(\frac{H}{R} \right)^{0.2927} \left(\left(\frac{A_d}{A_t} \right) \left(\frac{A_w}{A_d} \right) \omega \left(\frac{K_v}{D} \right) \right)^{0.206291} - 0.0012$$

Sedangkan persamaan untuk kisaran nilai N_{ITS} $10 - 200 \times 10^{-9}$, dalam penelitian ini belum bisa dianalisa dan dicantumkan. Karena keterbatasan material disk dalam penelitian ini.

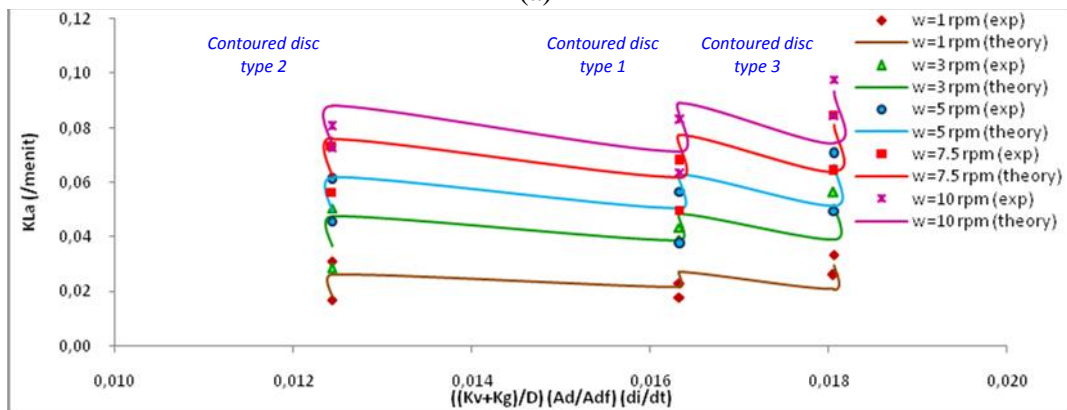
Untuk N_{ITS} di *flat disc*, jika diaplikasikan pada material disk lain diluar dalam penelitian ini, untuk mempermudah identifikasi, dapat menggunakan pendekatan *contact angel* (α). Seperti yang dijelaskan pada **Gambar 4.3**. visualisasi tetesan air di atas permukaan material disk. Hasil pengukuran dari visualisai di atas, secara kasar didapatkan *contact angle* rata-rata, untuk material disk masing-masing :

- *Acrylic*, $\alpha = 57^\circ$, $K_{ITS} = 2.15 \times 10^{-9}$ m, (*hidrophobic surface*)
- *Novotex O*, $\alpha = 48^\circ$, $K_{ITS} = 57.57 \times 10^{-9}$ m, (*hidrophobic surface*)
- *Novotex I*, $\alpha = 36^\circ$, $K_{ITS} = 95.26 \times 10^{-9}$ m, (*hidrophilic surface*)

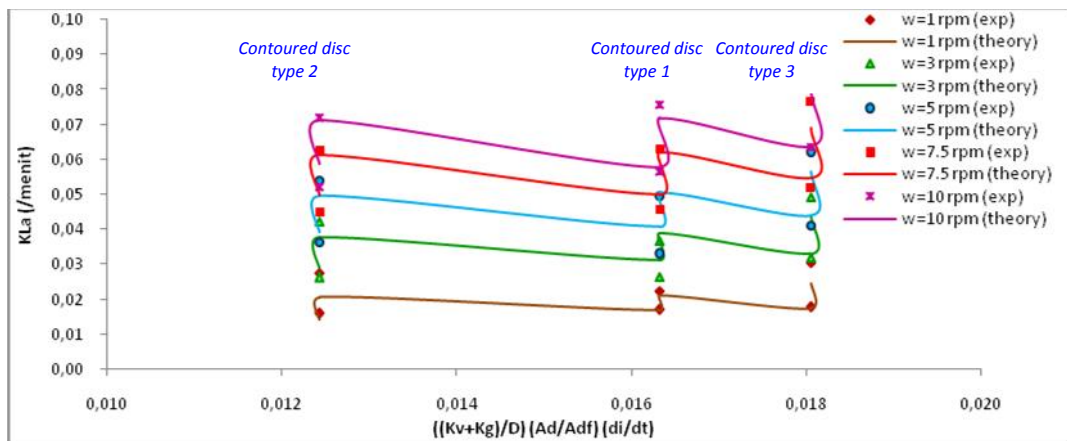
Gambar 4.3, di ambil pada temperatur ruangan pada kisaran $28^\circ\text{C} - 31^\circ\text{C}$, karateristik air bersih yang digunakan pada $\rho = 0.99681 \text{ gr/cm}^3$; $\nu = 0.8774 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}$; $\mu = 0.0008746 \text{ kg/m.s}$. Kondisi ini akan berbeda jika faktor temperatur, *densitas* dan *viscositas* berubah. Karena dalam penelitian Bico *et al.*, 2001 yang menyatakan kondisi hidrofilik pada $\alpha \leq 80^\circ$, di temperatur $19\text{-}20^\circ\text{C}$. Sedangkan pengaruh N_{ITS} di K_{La} *contoured disc*, dijelaskan pada **Gambar 4.49**



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.49. Bilangan N_{ITS} Pada Nilai K_{La} di *Contoured Disc* di Kedalaman Disk (a) $H=7$ cm; (b) $H=6.3$ cm dan (c) $H=2.5$ cm

Dari **Gambar 4.49**, dapat terlihat jelas pengaruh N_{ITS} pada profil nilai K_{La} di *contoured disc*. Dari grafik terlihat berdasar N_{ITS} , pada *contoured disc type 3* yang memiliki nilai N_{ITS} terbesar, di sifat material hidrofobik dan hidrofiliknya,

memiliki nilai K_{La} tertinggi. Hal ini juga dibuktikan pada model K_{La} di *contoured disc*, pada **Persamaan 4.14** dan **4.15**, yang lebih mudah pengelompokannya dengan bilangan N_{ITS} , yaitu :

- Rumus untuk K_{La} dengan : $12 \times 10^{-3} \leq N_{ITS} \leq 17 \times 10^{-3}$

$$KLa_{g1-2} = 1.014 \left(\left(\frac{D^2 \omega \rho}{\mu} \right) \left(\frac{\omega^2 D}{g} \right) \right)^{0.031} \left(\frac{H}{R} \right)^{0.025} \left(\left(\frac{D}{At^{0.5}} \right) \left(\frac{Aw}{Ad} \right) \omega \left(\frac{Kvg}{D} \right) \left(\frac{\delta}{V^{0.33}} \right) \right)^{0.33} - 0.001$$

- Rumus untuk K_{La} dengan : $18 \times 10^{-3} \leq N_{ITS} \leq 19 \times 10^{-3}$

$$KLa_{g1-2} = 1.006 \left(\left(\frac{D^2 \omega \rho}{\mu} \right) \left(\frac{\omega^2 D}{g} \right) \right)^{0.026} \left(\frac{H}{R} \right)^{0.133} \left(\left(\frac{D}{At^{0.5}} \right) \left(\frac{Aw}{Ad} \right) \omega \left(\frac{Kvg}{D} \right) \left(\frac{\delta}{V^{0.33}} \right) \right)^{0.301} - 0.0004$$

Dengan adanya N_{ITS} ini, diharapkan akan mempermudah aplikasi di lapangan untuk pemilihan jenis material disk, pola kontur yang akan diterapkan di permukaan disk, sehingga dapat mengestimasi nilai transfer oksigen fisik (K_{La}) di RBC. Dengan mengestimasi nilai transfer oksigen fisik (K_{La}), mempermudah langkah selanjutnya untuk desain RBC yang akan digunakan.

4.4. Peranan Model Terbangun Terhadap Aplikasi RBC Sebagai Pengolah Limbah Organik.

Model terbangun yang digunakan dalam penelitian ini, adalah model empirik yang menggambarkan laju transfer oksigen keseluruhan (*overall oxygen transfer*) sehingga dapat digunakan untuk mendesain RBC. Reaktor RBC bekerjanya dengan *biofilm* yang berfungsi sebagai pengurai zat-zat pencemar organik didalam limbah cair. Rumus empirik yang ada dalam penelitian ini belum memperhitungkan faktor *biofilm* dan limbah, untuk memodelkan transfer oksigen di RBC. Untuk itu jika diaplikasikan di lapangan, maka ada dua faktor yang harus diperhitungkan untuk model transfer oksigen di RBC, Di bawah ini, dijelaskan kedua faktor tersebut.

a. Ditambahkan Faktor Kecepatan Respirasi oleh *Biofilm*

Koefisien K_{La} dalam penelitian ini adalah koefisien transfer oksigen yang mengevaluasi karakteristik fisik seperti difusifitas molekular gas didalam air dan parameter - parameter dinamik yang mengkarakterisasi aliran di dalam RBC. Sehingga *liquid* yang digunakan adalah air bersih dan permukaan disk tanpa tertutup *biofilm*. Untuk itu keseimbangan transfer oksigennya dijelaskan dalam

Persamaan 2.1 yaitu persamaan yang digunakan untuk pencampuran sempurna di reaktor :

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_s - C)$$

Dalam persamaan ini, nilai $K_L a$ merupakan mekanisme transfer oksigen, khususnya transfer melalui aliran *liquid film* yang menempel di disk dan transfer yang berhubungan dengan atmosfer-*interface* di *liquid*.

Pada kenyataannya, bekerjanya RBC menggunakan biomass aktif dan limbah yang sebenarnya. Dari literatur (Kim dan Molof, 1982; Paolini, 1986; Boumansour *et al.*, 1995), ditambahkan faktor yang mewakili konsumsi oksigen oleh mikroba didalam *biofilm*. Maka persamaan keseimbangan transfer oksigennya menjadi (Boumansour *et al.*, 1998):

$$V' \frac{dC}{dt} = E \alpha K_L a (C^* - C) \dots\dots\dots(4.17)$$

Dengan : V' : volume air efektif pada saat disk tertutup *biofilm* (liter)

E : *enhancement factor* (dimensionless)

α : rasio $K_L a$ di air limbah dengan $K_L a$ di air bersih ($K_L a' / K_L a$)

$K_L a$: transfer oksigen di air bersih (menit⁻¹)

C^* : konsentrasi jenuh oksigen didalam limbah di reaktor, saat disk tertutup *biofilm* (mg/L)

C : konsentrasi oksigen di *liquid* (mg/l)

Dari **Persamaan 4.17**, untuk mendapatkan nilai transfer oksigen, dilakukan langkah yang sama dengan **Persamaan 2.1**. Yaitu dengan memplot di grafik $\ln (C^*-C)$ terhadap waktu, dan slope yang didapat dari regresi linier adalah $E \alpha K_L a$.

Menurut Paolini, 1986 dan Boumansour *et al.*, 1998, terdapat empat hal yang perlu diperhatikan untuk *enhancement factor* :

- a. Adsorpsi oksigen langsung oleh mikroorganisme diabaikan, sebagai gantinya aerasi yang terjadi melalui *liquid film*.

Hal ini karena *biofilm* tertutup oleh *liquid film* dari limbah

- b. Kecepatan pengambilan oksigen oleh biomass yang tersuspensi di dalam reaktor diabaikan, sebagai gantinya transfer oksigen oleh *biofilm* pada saat didalam reaktor.

Hal ini karena konsentrasi VSS (kurang lebih 140 mg/l) di limbah lebih kecil dibandingkan *biofilm* yang memiliki konsentrasi 17000-20000 mg/l VSS. Nilai VSS di limbah 4.5% dari biomass yang menempel di disk

- c. Parameter fisik dari transfer oksigen yang berhubungan dengan turbulensi aliran, tetap digunakan.
- d. Kecepatan pengambilan oksigen oleh *biofilm* dianggap sama, saat di *aerated zone* dan *submerged zone*.

Enhancement factor ini, adalah kecepatan respirasi oleh *biofilm*. Dijelaskan dari peneliti sebelumnya (Paolini, 1986; Boumansour *et al*, 1996) bahwa *Enhancement factor* berkurang jika kecepatan putaran disk ditambahkan. Dan Nilai *Enhancement factor* dari hasil eksperimen kedua peneliti di atas, didapatkan pada kisaran rata-rata 1- 2. Sedangkan persamaan *enhancement factor* adalah (Boumansour *et al.*, 1996) :

$$E = \frac{K_L \alpha' V'}{K_L \alpha V} \left(1 + \frac{A_w}{A_s} \right) \dots\dots\dots (4.18)$$

Dengan, E : *Enhancement factor*

K_{La}' : transfer oksigen di air limbah (menit⁻¹)

K_{La} : K_{La} di air bersih (menit⁻¹)

V' : volume air efektif pada saat disk tertutup *biofilm* (liter)

V : volume air efektif pada saat disk tertutup *biofilm* (liter)

A_w : luas disk basah di *aerated zone* (m²)

A_s : luas disk di *submerged zone* (m²)

Kondisi di **Persamaan 4.17** adalah *batch process*, dimana pengambilan oksigen oleh biomass dengan berjalannya waktu akan terbatas. Untuk menjaga respirasi biomass tetap terjaga, maka proses yang digunakan adalah *continuous process*. Persamaan transfer oksigen untuk proses kontinyu, dijelaskan oleh Paolini (1986) pada **Persamaan 4.18** di bawah ini.

$$\frac{dC}{dt} = (E \alpha K_L \alpha + \frac{Q}{V'}) C^* - C) \dots\dots\dots (4.19)$$

Jika diintegalkan, menjadi :

$$C = C^* - (C - C_0) \exp(-bt) \dots\dots\dots (4.20)$$

Dengan : C : konsentrasi oksigen di *liquid* (mg/l)

C* : konsentrasi jenuh oksigen didalam limbah di reaktor, saat disk tertutup *biofilm* (mg/L)

C₀ : konsentrasi oksigen di *liquid* pada t = 0 (mg/l)

Q : debit influen (L/detik)

Nilai b dari **Persamaan 4.20**, yaitu :

$$b = E \alpha K_L \alpha + \frac{Q}{V} \dots\dots\dots (4.20)$$

Persamaan di atas, berlaku untuk transfer oksigen di RBC dengan *single stage*.

Jadi, model transfer oksigen dalam penelitian ini tetap valid digunakan untuk merancang protipe RBC di lapangan. Dari model yang ada dalam penelitian ini ditambahkan *enhancement factor* sebagai faktor kinetika respirasi *biofilm*.

Sedangkan parameter sebangun dinamik yaitu gaya-gaya yang diekspresikan dari bilangan tak berdimensi dalam penelitian, yaitu Bilangan Reynolds (N_{Re}), bilangan Froude (N_{Fr}) dan faktor kedalaman disk (H/R) dirangkum sebagai bilangan Sherwood (N_{SH}) digunakan untuk merancang *prototipe* RBC di lapangan, yang dijelaskan dalam faktor ke dua yang dibutuhkan untuk merancang prototipe RBC di lapangan.

b. Desain Prototip RBC Pada Model Terbangun

Untuk desain prototip RBC, maka ditinjau parameter sebangun geometri dan sebangun dinamik. Sebangun geometrik, dipenuhi apabila model dan prototip mempunyai bentuk yang sama, tetapi berbeda ukuran. Diharapkan untuk desain RBC ini, sebangun geometrik sempurna (tanpa distorsi). Pada sebangun geometri, skala panjang arah horisontal dan skala panjang arah vertikal adalah sama (Yuwono, 1996), dijelaskan dalam persamaan di bawah ini

$$n_A = \frac{A_p}{A_m} \dots\dots\dots (4.18)$$

Dengan, n_A : skala luas

A_p : luas untuk prototip (L²)

A_m : luas untuk model (L^2)

n_L : skala panjang (L)

Skala luas ini, dilanjutkan dengan menghitung skala diameter, skala tebal disk, skala jarak disk, skala jarak poros disk ke permukaan air, skala I, skala panjang bak reaktor, skala lebar reaktor, skala luas permukaan bak dan skala volume bak.

Sebangun dinamik, dipenuhi apabila model dan prototip untuk seluruh pengaliran pada arah yang sama. Dalam penelitian ini, sebangun dinamik yang berpengaruh terhadap transfer oksigen di RBC, adalah bilangan Sherwood. Bilangan Sherwood di RBC, meliputi Reynolds, bilangan Froude dan kedalaman disk (H/R).

$$n_{Sh} = n_{Re} \times n_{Fr} \times n_I$$

$$1 = \frac{(n_D)^2 \times n_u}{n_v} \times \frac{n_u^2 \times n_D}{n_g} \times n_I$$

$$n_u = \sqrt[3]{\frac{n_v \times n_g}{n_D^2 \times n_I}} \dots\dots\dots(4.19)$$

Dengan, n_{Sh} : skala bilangan Sherwood

n_{Re} : skala bilangan Reynolds

n_{Fr} : skala bilangan Froude

n_U : skala kecepatan (L/T)

n_L : skala panjang (L)

Dari rumus 4.19, akan didapatkan konversi kecepatan putaran disk di prototipe RBC di lapangan. Untuk kecepatan putaran disk (ω) model pada kisaran 1-20 rpm atau 0.105-2.0947 rad/detik, akan terkonversi di prototipe menjadi 0.278-5.56 rpm atau 0.029-0.582 rad/dt. Kecepatan putaran disk masih bisa masuk pada kisaran kecepatan putaran prototipe di minimal kecepatan putaran model 5 rpm.

Jadi, parameter sebangun geometrik, dinamik dan kinematik dari model terbangun dalam penelitian ini, yang memiliki kisaran nilai tertentu (dapat dilihat pada **Tabel 4.17**) sesuai dan valid untuk memberikan pertimbangan pemikiran dalam desain RBC di lapangan. Sehingga diharapkan kinerja RBC sebagai pengolah limbah dapat lebih ditingkatkan di masa mendatang.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, disimpulkan beberapa hal yang dihasilkan dari rangkaian penelitian disertasi ini, yaitu :

1. Faktor kekasaran permukaan dan komponen kecepatan disk, ber-pengaruh terhadap ketebalan *liquid film* dan transfer oksigen fisik di RBC. Kekasaran permukaan yang dianalisa, meliputi ukuran mikrometer dan makrometer. Komponen kecepatan disk, meliputi kecepatan di sisi tepi disk dan kecepatan karena kedalaman disk. Pengaruh faktor kekasaran permukaan di disk permukaan datar, membagi sifat material menjadi dua, yaitu bersifat hidrofilik dan hidrofobik. Material yang terbaik untuk meningkatkan transfer oksigen fisik di RBC, adalah yang bersifat hidrofilik.
2. Model estimasi transfer oksigen fisik di RBC berdasarkan model empirik Analisis Dimensi, dipengaruhi oleh tiga kelompok utama, yaitu : (1) gaya-gaya yang bekerja (dapat dilihat dari bilangan *Sherwood*) (2) parameter desain dan operasi (kecepatan putaran, kekasaran permukaan, diameter, luas disk, luas permukaan *bulk rector*, luas basah disk, ketebalan *liquid film*, *working volume*); Kedua kelompok tersebut telah terintegrasi pada persamaan model transfer oksigen fisik yang dihasilkan. Visualisasi aliran berbasis CFD, parameter operasional yang digunakan dalam program sudah tervalidasi dan *liquid film* yang terbentuk hanya dapat menunjukkan *liquid film* di disk secara kualitatif pada kecepatan 10 rpm, namun belum bisa menunjukkan tebal *liquid film*.
3. Selanjutnya, penelitian ini juga mempelajari mekanisme transfer oksigen fisik di RBC. Pada mekanisme transfer oksigen fisik pada rangkaian disk permukaan datar, didapatkan dua kondisi mekanisme berdasarkan kekasaran permukaan. Pada mekanisme yang pertama, di kekasaran permukaan kurang dari 10 nm, maka transfer oksigen fisik melalui gerakan *liquid* di *bulk reactor*. Mekanisme yang kedua, di kekasaran permukaan lebih dari 50 nm, transfer

oksigen melalui gerakan *liquid* di *bulk reactor* dan *liquid film*. Sedangkan mekanisme transfer oksigen fisik di disk permukaan berkontur, konsepnya sama dengan di disk permukaan datar, tetapi perbedaannya di parameter kekasaran permukaan secara makroskopik. Dengan menambahkan nilai K_g saja, tidak bisa menggambarkan perubahan pola kontur permukaan disk yang variatif. Maka dalam penelitian ini, diperkenalkan, variabel baru N_{ITS} (*the number of roughness and contoured pattern surface, in rotating vertically flow*) dengan persamaan :

$$N_{ITS} = (K_v + K_g) \left(\frac{A_d}{A_{df}} \right) \left(\frac{d_i}{d_r} \right)$$

Dengan N_{ITS} ini, diharapkan akan mempermudah aplikasi di lapangan untuk pemilihan jenis material disk dan pola konturnya.

5.2. Saran

Beberapa hal yang perlu dilanjutkan (*future work*) untuk menyempurnakan penelitian ini, yaitu :

1. Melanjutkan penelitian transfer oksigen di RBC dengan menggunakan *biofilm* yang menempel di disk dan limbah sebenarnya.
2. Melanjutkan visualisasi *liquid film* menggunakan *software* CFD, dengan redesain ulang sistem yang ada.
3. Menambahkan variasi material disk dan pola kontur diluar kisaran K_{ITS} penelitian, sehingga model terbangun dapat lebih aplikatif pada kekasaran permukaan yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- Afanasiev, K., Munch, A., Wagner, B., (2008), "Thin Film Dynamics on a Vertically Rotating Disk Partially Immersed in a Liquid Bath", *Science Direct, Applied Mathematical Modelling* 32, pp. 1894-1911
- Anggrahini, (2005), "Hidrolika Saluran Terbuka", Srikandi, Surabaya
- Anonim. (2011). "ANSYS FLUENT USER GUIDE". Canonsburg: ANSYS Inc.
- Ashadi, M., Ebrahimi, A., Najafpour, G., D., (2009), Dairy Wastewater Treatment Using Three-Stage Rotating Biological Contractor (NRBC)", *IJE Transaction B: Application Vol. 22 No.2*.
- Baldyga, J., Henczka, M., Makowski, L., (2001), "Effect of Mixing on Parallel Chemical Reaction in a Continuous Flow Stirred Tank Reactor", *Trans. IChem E, Vol. 79, Part A, pp. 895-900*.
- Bhatelia, T.J., Utikar, R.P., Pareek, V.K., dan Tade, M.O., (2009), "Characterizing Liquid Film Thickness In Spinning Disc Reactors", *Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, CSIRO, Melbourne, Australia*.
- Bico, J., Tordeux, C., Quere, D., (2001), "Rough Wetting", *Europhys Lett* 55 (2) pp 214-220.
- Bintanja, H.H.J. Erve, J.J.V.M, Boelhoefer, C. (1975), "Oxygen Transfer In A Rotating Disk Treatment Plant", *Water Research Vol. 9, pp 1147-1153*
- Boumansour, B.E., Vasek J.L, (1998), "A New Tracer Gas Method To Measure Oxygen Transfer and Enhancement Factor on RBC", *Water Research Vol 32, No. 4, pp 1049*
- Box, G.E.P., Hunter, W.G., Hunter, J.S (1978), "Statistics For Experimenters", John Wiley & Sons, New York
- Benfield, L.D., Randall, C.W., (1980). "Biological Process Design for Wastewater Treatment", Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, NJ 07632
- Bennet, C.O., dan Myers, J.E., (1975), "Momentum, Heat, and Mass Transfer", McGraw-Hill International Book Co., Singapore
- Burns, J., R., Ramshaw, C., Jachuck, R., J., (2003), "Measurement of Liquid Film Thickness and The Determination of Spin-Up Radius on a Rotating Disk Using an Electrical Resistance Technique", *Elsevier, Chemical Engineering Science* 58 pp 2245-2253.
- Cervo, D.G., Mansur, S.S., Vieira, E.D.R., (2013), "Flow Over Rough Surfaces", *22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013), Brazil.*, CIESC Journal.
- Cahyana, Chevy (2005), "Model Hidrodinamika Laut", Pusat Teknologi Limbah Radioaktif, BATAN
- Carlos, M., Claudia, A., Lozano, C, Denis, Julia, C., Rosa, C., Atl, C., Nayeli, M., Jesus, G., (2015), "Mass Transfer Coefficient ($k_L a$) Determination With Microelectrodes in Biofilm From an RBC at Different Operation Conditions", *International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology Vol 2 Issue 2 pp 529-534*.

- Chen, C.I., (2007), "Non-Linear Stability Characterization of The Thin Micropolar Liquid Film Flowing Down The Inner Surface of a Rotating Vertical Cylinder", *Science Direct, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* 12, pp. 760-775.
- Courstens, E.N.P., (2014), "Control of Nitrification in an Oxygen-Limited Autotrophic Nitrification/denitrification Rotating Biological Contactors Through Disk Immersion Level Variation", *Bioresouce Technology* 155, 182-188.
- Chow, V.T., (1959), "Open Channel Hydraulics, International Student Edition", *McGraw-Hill Book Company, Tokyo, Japan*
- Anonim, (2009), "Coated Textile with Self - Cleaning Surface", Patent Application Publication, *US 2009/0137169 A1*
- Deng, B., Gance, DAI., (2015), "Numerical Simulation of Surface Renewal Frequency on Vertically Rotating Disk", *CIESC Journal*
- Dutta, Sanjay, (2007), "Mathematical Modelling of the Performance of a Rotating Biological Contactors for process Optimisation in Wastewater Treatment", *Karlsruhe, Univ., Diss., Germany*.
- Eckenfelder Jr., W.W., (2006), "Industrial Water Pollution Control, third ed. Mc Graw Hill Edition, Mc Graw Hill Book Co-Singapore, Singapore, pp. 181-182
- Fayolle, Y., Cockx, A., Gillott, S., Roustan, M., Heduit, A., (2007), "Oxygen Transfer Prediction in Aeration Tanks Using CFD", *Chemical Engineering Science*, 62, 7163-7171
- Filali, A., Khezzar, L., Mitsoulis, E., (2013), "Some Experiences With The Numerical Simulation of Newtonian and Bingham Fluids in Dip Coating", *Computers and Fluids*, 82, 110-121
- Ghazimoradi, S., James, A.E., (2003), "A Scale Up Design Procedure For Rotating Biological Contactors", *IJE Transaction A: Basic, Vol. 16 No.2, June 2003*
- Gaskell, P., H., Jimack, P., K., Sellier, M., Thompson, H., M., Wilson, M., C., T., (2004), "Gravity-Driven Flow of Continuous Thin Liquid Films on Non-Porous Substrates with Topography", *J. Fluid Mech Vol 509 pp 253-280*.
- Guriyanova, S., Semin, B., Rodrigues, T., S., Butt, H., J., Banaccuso, E., (2010), "Hydrodynamic Drainage Force in a Highly Confined Geometry: Role of Surface Roughness on Different Length Scales", *Microfluid Nanofluid* 8 : 653-663.
- Hendrasarie, N., (2014), "Determination of Organic Loading and Hydraulic Loading Rate The Rotating-Geared Blade Discs-Contactor For Nitrate Containing Organic Waste", *Proceedinga Bali International Seminar On Science and Technology, BISSTECH II*.
- Iriawan, Nur., Astuti, S.P., (2006), "Mengolah Data Statistik Dengan Mudah Menggunakan Minitab 14", *Penerbit Andi, Yogyakarta, Indonesia*
- Jimenez, J., (2004), "Turbulen Flows Over Rough Walls", *Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 36, pp. 173-196*.
- Kargi, F. and Eker, S., (2001), "Rotating Perforated Tubes Biofilm Reactor for High Strengh Wasterwater Treatment", *Journal of Environmental Engineering, Vol.127, No.10*.

- Kim, B.J., Molof, A.H., (1982), "The Scale Up and Limitation of Physycal Oxygen Transfer in Rotating Biological Contactors", *Water Sci. Technol.* Vol.98, pp 118-129
- Kulkarni, W., et.al., (2012), "Review on Process, Application and Performance of Rotating Biological Contactors (RBC)", *Internasional Journal of Scientific and Research Publication*, Volume 2, Issue 7, July 2012.
- Kubsad, V., Chaudhari, S., Gupta, S.K., (2004), "Model for Oxygen Transfer in Rotating Biological Contactors", *Water Reserch* Vol.38, 4297-4304.
- Krechetnikov, R. and Homsy, G.M. (2005), "Dip Coating In The Presence of a Substrate Luquid Interaction Potential", *Phisics of Fluids* 17.
- Laakkonen, M., Moilanen, P., Alopaeus, V., Aittamaa, J., (2007), "Modelling Local Gas-Liquid Mass Transfer in Agitated Vissels", *Chemical Engineering Research and Design, Trans IChemE Part A. Vol 85 (A5) pp 665-675.*
- Lamping, S., R., Zhang, H., Allen, B., Shamlou, P., A., (2003), " Design of a Prototype Miniature Bioreactor for High Throughput Automated Bioprocessing", *Elsevier Chemical Engineering Science* 58 pp 747-758.
- Landau L., Levich B., (1942), "Dragging of a Liquid by Moving Plate", *Acta Physicochimica U.R.S.S*, Vol.17, No.1-2.
- Lankford, P.W., Eckenfelder Jr., W.W. (Eds), (1990), "Toxicity Reduction in Industrial Effluents", *Van Nostrand Reinhold, New York.*
- Littleton, H., X., Daigger, G., T., Strom, P., F., (2015), "Application of Computational Fluid Dynamics to Closed-Loop Bioreactors : I. Characterization and Simulation of Fluid-Flow Pattern and Oxygen Transfer", *Water Enviroment Research* Vol. 79 No. 6 pp 600-612.
- Liow, K., Y., S., Tan, B., T., Thouas, G., A., Thompson, M., C., (2008), "CFD Modelling of The Steady-State Momentum and Oxygen Transport in a Bioreactor that is Driven by an Aerial Rotating Disk", *World Science Publishing Company* 15:45 pp 1-7.
- Ma, F., (1994), "Flow of a Thin Film Over a Rough Rotating Disk", *Engineering Mechanics* 9 pp 39-45.
- Mba, D., (2003), "Mechanical Evolution of The Rotating Biological Contactor into The 21st Century", *Journal of Mechanical Engineering*, Vol 207.
- Metcalf and Eddy. (2003), "Waste Water Engineering Fourth Edition", *Mc Graw-Hill Company, New York.*
- McCabe, W.L., Julian C. Smith dan Harriot, Peter (1990). "Operasi Teknik Kimia. Jilid I dan II." *Edisi keempat. Terjemaham E. Jasjfi. Erlangga. Jakarta.*
- Mba, D., Bannister, R.H. dan Findlay, G.E. (1999). "Mechanical Redesign of the Rotating Biological Contactor". *Water Research. Vol. 33, pp. 3679 – 3688.*
- Mba, D., (2003), "Mechanical Evolution of The Rotating Biological Contactor into the 21st Century", *Journal of Mechanical Engineering, Vol 207, no. 3.*
- Mirwan, A., (2013), "Keberlakuan Model HB-GFT Sistem n-Heksana-Mek-Air Pada Ekstraksi Cair-Cair Kolom Isian". *Konversi, Volume 2 No. 1, April 2013, hal. 32-38.*

- Miah, M.,S., Dassler, C., Yang, X., Hu, J., (2012), "CFD Modelling of Highly Viscous Polymer Thin Film Flow On Vertically Rotational Disk Partially Immersed In Liquid For Synthesis of Polyethilenterephthalat", *HEVAT 2012,China*
- Miah, M.,S., Al-Assaf, S., Yang, X., McMillan, A., (2016), " Thin Film Flow On A Vertically Rotating Disk of Finite Thickness Partially Immersed in A Highly Viscous Liquid", *Chemical Engineering Science* 143 pp 226-239.
- Montgomery, D.C., (2004), "Design and Analysis of Experiments", *Wiley, NY*.
- Mukherji, Chavan, A., Suparna, (2007), "Dimensional Analysis for Modelling Oxygen Transfer in Rotating Biological Contactors", *Bioresource Technology* 99, 3721-3728
- Ochoa, G.F. dan Gomez, E. (2009), "Bioreactor Scale-up and oxygen Transfer Rate in Microbial Processes: An Overview", *Biotechnology Advances*, Vol. 27, pp. 153-176.
- Ouano, E.A.R., (1978), "Oxygen Mass Transfer Scale Up in Rotating Biological Contactors", *Water Research*, 12, 1005-1008.
- Palma, L.D., dan Verdone, N., (2009), " The Effect of Disk Rotational Speed on Oxygen Transfer In Rotating Biological Contactors", *Bioresource Technology* 100; 1467-1470.
- Paneerselvam, R., (2009), "CFD Simulation of Multiphase Reactors", *Thesis from Cochin University of Science and Technology, India*
- Paolini, A., E., Variali, G., "Kinetic Consideration On The Performance of Activated Sludge Reactor and Rotating Biological Contactor", *Water Res. Vol. 16 pp. 155 to 160*.
- Patwardhan, A., W., (2003), "Rotating Biological Contractor : A Review", *Ind. Eng. Chem. Res., Vol 42 No. 10*.
- Perry, A.E., Schofield, W.H. dan Joubert, P., (1969), "Rough Wall Turbulent Boundary Layers", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.73, pp. 383-413.
- Prandtl, L., dan Tietjens, O.G., (1934), "Applied Hydro and Aeromechanics", *General Publishing Company, Ltda, Toronto, Canada*.
- Prieling, D., Steiner, H. dan Vita, P. (2009), "Numerical Investigation of Liquid Film Flow On A Rotating Disk", *Ercoftac ADA PC Meeting, Vienna*.
- Prins, J.G., dan Pretorius, W.A. (1987), "Rotating Biological Contactor Modelling-A Fundamental Approach", *WISA 1987 Biennial conference and exhibition, Port Elizabeth*
- Rahman, M.M., dan Faghri, A., (1993), "Gas Absorption and Solid Dissolution in a Thin Liquid Film on a Rotating Disk", *Int. J Heat Mass Transfer*, Vol. 36. No. 1. pp 189-199
- Ramaswami, A., Milford, J.B., Small, M.J., (2005), "Integrated Environmental Modelling : Pollutant Transport, Fate, and Risk in the Environment", *John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey*.
- Reid, R.C., Jhon M. Prausnitz, dan Thomas K. Sherwood., (1991), "Sifat Gas dan Zat Cair", *Edisi ketiga. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta. The Properties of Gases and Liquids. Third Edition. McGraw-Hill, Inc.*
- Rittmann, B.E., Suozzo, R., Romero, B.R. (1983), "Temperature Effects On Oxygen Transfer To Rotating Biological Contactors", *J. Water Pollution Control, Fed.* 55, 270-277

- Rodd, L., E., Rosengarten, G., Huntington, S., T., Lyytikainen, K., Boger, D., V., Cooper-White, J., J., (2003), "The Effect of Surface Character on Flows in Cylindrical Microchannel", *7th International Conference on Miniaturized Chemical and Biochemical Analysis Systems* pp 951-954.
- Said, N.I., (2005). "Pengolahan Air Limbah dengan Sistem Reaktor Biologis Putar (*Rotating Bio Contactors*) dan Parameter Desain". *JAI Vol 1, No. 2*.
- Sanjay, Dutta, (2007), "Mathematical Modelling of The Performance of a Rotating Biological Contactors For Process Optimisation in Wastewater Treatment", *Dissertation, Karlsruhe*
- Shieh, W., K., (1982), "Mass Transfer In a Rotating Biological Contractor", *Water Res. Vol. 16 pp 1071-1074*.
- Sima, J., Pocedic, J., Roubickova, T., Hasal, P.A., (2012), "Rotating Drum Biological Contactor and Its Application For Textile Dyes Decolorization", *SciVerse ScienceDirect, Procedia Engineering 42, pp 1579-1586*.
- Sirianuntapiboon, S., Chuamkaew, C., (2007), "Packed Cake Rotating Biological Contactor System of Treatment Cyanida Wastewater Treatment", *Bioresource Technology 98, pp 266-272*
- Sareen, A., (2012), "Drag Reduction Using Riblet Film Applied to Airfoils for Wind Turbines", *Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 237 p*.
- Suga, Kenichi dan Boongorsrang, A., (1984), "A New Model of Transfer In A Rotating Disk Contactors", *Chemical Engineering Science, Vol. 39, No.4, pp.767-773*.
- Schlichting, H., (1968), "Boundary-Layer Theory", *McGraw-Hill Book Company, Sixth Edition, New York*.
- Tanaka, Nao., (2008), "Seminar Teknologi Tepat Guna Pengolahan Limbah Cair". *Pusteklim, Yogyakarta*.
- Triatmojo, B., (2003), "Hidraulika II". *Beta Offset, Yogyakarta*.
- Tanguy, P., Fortin M., Choplin I., (1984), "Finite Element Simulation of Dip Coating, in Newtonian Fluids", *Int J Num Meth Fluids, Vol 4, pp. 441-457*
- Treybal, R.E. (1984), "Mass-Transfer Operations", *Mc Graw Hill International Book Company*.
- Versteeg, H.K., Malalasekera, W., (2007), "An Introduction to Computational Fluid Dynamics", *Pearson Education Limited, Edinburgh Gate, Essex, England*
- Welty, J.R., Wicks, C.E., Wilson, R.E., (1984), "Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer", *John Wiley & Sons, Singapore*
- White, F.M., (2011), "Fluid Mechanics", Seventh Edition, *Mc-Graww Hill Companies, New York*.
- Yamane, T., Yoshida, F., (1972) "Absorption in a Rotating Disk Gas-Liquid Contactor", *Journal Chemical Engineering, Japan, 5, pp 55-59*.
- Yoon, M.S., Hyun, J.M., Park, J.S., (2007), "Flow and Heat Transfer Over a Rotating Disk With Surface Roughness", *Science Direct International Journal of Heat and Fluid Flow 28 pp 262-267*.
- Yuwono, Nur, (1996) "Perencanaan Model Hidraulik", Universitas Gajah Mada, Yogyakarta

- Zhang, H., Zhang, K., Fan, Z., (2009), “CFD Simulation Coupled With Population Balance Equation For Aerated Stirred Bioreactor”, *Eng. Life Science Journal* 9 No.1 pp 1-10.
- Zeevalkink J.A., Kelderman,P., Visser,D.C., Boelhouwer,C., (1978), “Liquid Film Thickness In A Rotating Disc Gas-Liquid Contactors”, *Water Research* Vol.12, pp.577-581
- Zeevalkink J.A., Kelderman,P., Visser,D.C., Boelhouwer,C., (1979), “Physical Mass Transfer In Rotating Disk Gas-Liquid Contactors”, *Water Research* Vol.13, pp.913-1919

BIODATA PENULIS

Data Personil

Nama : Novirina Hendrasarie
Tempat,Tanggal Lahir : Jember, 26 November 1968
Pekerjaan : Dosen
Institusi Kerja : Universitas Pembangunan Nasional “Veteran”
Jawa Timur
Alamat Institusi : Jl. Raya Rungkut Madya, Gunung Anyar, Surabaya
Email : novirina@upnjatim.ac.id
hendrasarie@gmail.com

Riwayat Pendidikan Tinggi

1. S-1 Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya
2. S-2 Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya

Publikasi Ilmiah Selama Studi Program Doktor

A. Jurnal Internasional

1. Novirina Hendrasarie, Joni Hermana, Tantular Nurtono, Sanggar Dewanto, (2015), *Rough and splitted on the surface of disc in rotating biological contactor to treat tempeh wastewateer*, Journal Applied Environmental and Biological Science, 5 (12), pp.56-63, ISSN: 2090-4274
2. Novirina Hendrasarie, Sanggar Dewanto, Tantular Nurtono, Joni Hermana, (2017), *Measurement of liquid film thickness on the hydrophobic surfaces at the rotating vertically disc contactor*, ARPN Journal of Engineering and Applied Scinces, 12 (5), pp. 1422-1428, ISSN:1819-6608
3. Novirina Hendrasarie, Sanggar Dewanto, Tantular Nurtono, Joni Hermana, (2017), *Experimental Study of the Liquid Film Flow on Rotating Disc Contactor of Rough Surface Partially Immersed in Liquid Bath*, International Journal of ChemTech Research, Vol.10, No.07, pp 01-09, ISSN:0974-4290
4. Novirina Hendrasarie, Sanggar Dewanto, Tantular Nurtono, Joni Hermana, (2017), *Impact of surface roughness on physical oxygen transfer in rotating biological contactor*, (submitted in Water Science and Technology, IWA Publishing)
5. Novirina Hendrasarie, Sanggar Dewanto, Tantular Nurtono, Joni Hermana, (2017), *Dimensional analysis for modelling liquid film flow over surface roughness of disc in rotating vertically disc contactor*, Fluid Dynamic Research, Elsevier Publishing (draft process)

B. Pertemuan Ilmiah

1. Novirina Hendrasarie, Joni Hermana, Tantular Nurtono, Sanggar Dewanto, (2016), *The Liquid Film Flow on Rotating Disc Contactor of Rough Surface*, 2nd International Seminar on Chemistry, July 26 to 27th 2016

